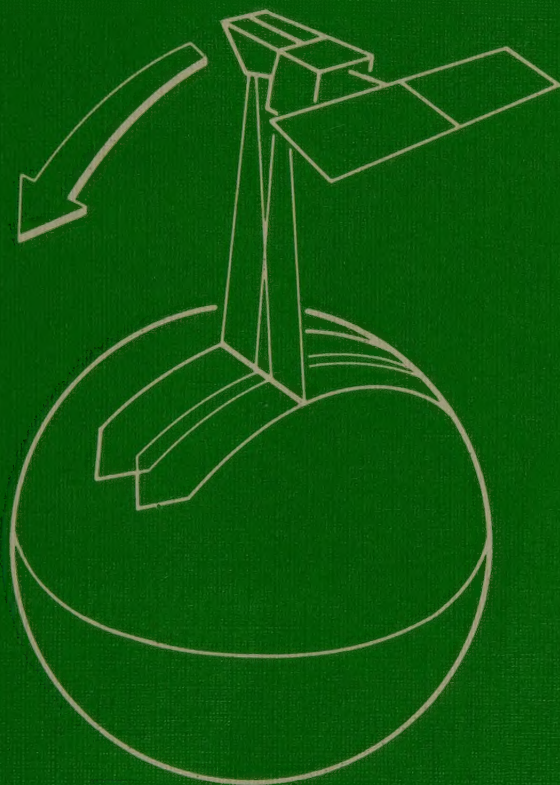


**K. KRAUS / W. SCHNEIDER**

---

# **FERNERKUNDUNG**

---



**BAND 1**

**Physikalische Grundlagen  
und Aufnahmetechniken**

---

 **ÜMMLER / BONN**



KARL KRAUS / WERNER SCHNEIDER

**FERNERKUNDUNG**

Band 1

Physikalische Grundlagen und Aufnahmetechniken

Band 1

Physikalische Grundlagen  
und  
Aufnahmetechniken

von

Prof. Dr.-Ing. Karl KRAUS

Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung  
der Technischen Universität Wien

und

Dr.-Ing. Werner SCHNEIDER

Institut für Vermessungswesen und Fernerkundung  
der Universität für Bodenkultur, Wien

528 187 Abbildungen

und 16 Tabellen

Düsseldorf 1980

FERD. SCHÜMLER<sup>®</sup> VERLAG · BONN







---

# FERNERKUNDUNG

---

**Band 1**

**Physikalische Grundlagen  
und  
Aufnahmetechniken**

von

**Prof. Dr.-Ing. Karl KRAUS**

**Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung  
der Technischen Universität Wien**


und

**Dr.-techn. Werner SCHNEIDER**

**Institut für Vermessungswesen und Fernerkundung  
der Universität für Bodenkultur, Wien**

**Mit 137 Abbildungen  
und 15 Tabellen  
Dümmlerbuch 7866**

---

**FERD.  ÜMMLER<sup>s</sup> VERLAG · BONN**

---

Beachten Sie bitte die Firmen- und Verlagsanzeigen am Schluß des Bandes.

---

ISBN 3-427-78661-7

Das Werk und seine Teile sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung in anderen als den gesetzlich zugelassenen Fällen bedarf deshalb der vorherigen schriftlichen Einwilligung des Verlages.

© 1988 Ferd. Dümmers Verlag, Kaiserstraße 31–37 (Dümmelhoaus), 5300 Bonn 1

Printed in Germany by Hans Richarz Publikations-Service, 5205 St. Augustin 1

## VORWORT

Die Bände 1 und 2 dieses Lehr- und Übungsbuches sind aus zwei Vorlesungen hervorgegangen. Die eine Vorlesung

"Erfassung von Umweltparametern aus Flugzeugen und Satelliten"

gehört zu dem an der Technischen Universität Wien gemeinsam mit der Wiener Universität für Bodenkultur eingerichteten Aufbaustudium "Technischer Umweltschutz". Das Auditorium in dieser Vorlesung mit Übersichtscharakter ist bunt gemischt: Architekten und Raumplaner, Bauingenieure, Chemiker, Elektrotechniker und Elektroniker, Informatiker, Kulturtechniker, Land- und Forstwirte, Maschinenbauer, Mathematiker und Physiker. Die andere Vorlesung

"Technik der Fernerkundung und der digitalen Bildverarbeitung"

ist eine Vorlesung im Rahmen der Studienrichtung Vermessungswesen an der Technischen Universität Wien. Die Hörer dieser Vorlesung haben bereits intensive Studien der Photogrammetrie hinter sich, deren Inhalt weitgehend in den beiden - ebenfalls im Dümmler Verlag erschienenen - Büchern niedergelegt ist:

K. Kraus mit Beiträgen von P. Waldhäusl: Photogrammetrie, Grundlagen und Standardverfahren. 2. Auflage, 1986.

K. Kraus: Photogrammetrie, Theorie und Praxis der Auswertesysteme. 1. Auflage, 1984. (Unveränderter Nachdruck, 1987).

Die beiden erwähnten Vorlesungen können unter dem Überbegriff "Fernerkundung" zusammengefaßt werden. Um Überschneidungen mit bereits Bekanntem auszuschalten und um den Lesern unnötige Details zu ersparen, wird der Inhalt zur Orientierung wie folgt gekennzeichnet:

- Links markierte Passagen sind für die Leser interessant, die sich einen Überblick über die Fernerkundung verschaffen wollen.
- Rechts markierte Passagen sind für die Leser interessant, die die erwähnten Photogrammetrie-Bücher kennen und sich in die Fernerkundung vertiefen wollen.
- Die Passagen ohne Markierung sind für beide Gruppen von Lesern vorgesehen.

Das Lehr- und Übungsbuch in seiner Gesamtheit ist demnach für Leser konzipiert, die sich in der Fernerkundung ein über eine Einführung hinausgehendes Wissen und in der Photogrammetrie einen Überblick aneignen wollen.



Nach allgemeinen Vorbemerkungen behandelt dieses Buch einige physikalische Grundlagen der Fernerkundung, auf die in den folgenden Abschnitten zurückgegriffen wird und die in den jeweiligen Abschnitten noch ergänzt werden. Im 3. Abschnitt geht es um die Aufnahmesysteme beginnend mit der Photographie über die abtastenden Systeme (scanner) bis zur Radartechnik. Den für Fernerkundungsaufnahmen verwendeten Luft- und Raumfahrzeugen, dem Angebot und der Beschaffung von Fernerkundungsdaten ist ein eigener Abschnitt gewidmet, in dem zuerst die diesbezüglichen Erläuterungen zu den Flugzeugaufnahmen gemacht werden und dann auf die aktuellen erdkundenden Satelliten mit ihren Sensoren und Flugparametern eingegangen wird. Im nächsten, dem 5. Abschnitt, wird auf die Auswerteverfahren photographischer Bilder eingegangen. Dieser Abschnitt enthält eine "Mini-"Photogrammetrie und Anleitungen zur visuellen Interpretation photographischer Bilder. Der 6. Abschnitt befaßt sich mit der immer wichtiger werdenden digitalen Bildverarbeitung unter Einbeziehung der geometrischen und radiometrischen Rektifizierung. In den einzelnen Abschnitten werden auch anwendungsorientierte Projekte angesprochen.

Dieser Stoff ist so umfangreich, daß sich eine Aufteilung auf zwei handliche (Teil-)Bände anbot. Die ersten vier Abschnitte sind zum Band 1 (Physikalische Grundlagen und Aufnahmetechnik) und die beiden letzten Abschnitte zum Band 2 (Auswertung photographischer und digitaler Bilder) zusammengefaßt. Zur leichteren Benutzung ist das Inhaltsverzeichnis von Band 2 auch in Band 1 auf den Seiten 4 bis 6 wiedergegeben. Das Sachregister von Band 1 enthält nur die Schlagworte dieses Bandes, wohingegen das Sachregister von Band 2 den Inhalt der beiden Bände aufschlüsselt.

Der in den beiden erwähnten Photogrammetrie-Büchern eingeschlagene und auf Grund des guten Verkaufserfolges bestätigte Weg, die theoretischen Grundlagen unmittelbar mit praxisbezogenen Zahlen- und Bildbeispielen zu veranschaulichen, wurde auch in den beiden Fernerkundungsbüchern beibehalten. Außerdem bieten zahlreiche eingestreute Aufgaben die Möglichkeit einer Selbstkontrolle.

Die Fernerkundung ist interdisziplinär. Bereits die Grundlagen, die in Band 1 im Mittelpunkt stehen, gehen über das Wissensgebiet eines Hochschullehrers hinaus. Um weniger in der Literatur gesammeltes Wissen als vielmehr schwerpunktmäßig durch eigene Forschung vertiefte Erkenntnisse veröffentlichen zu können, hat mich bei der Bearbeitung des Bandes 1 Herr Dipl.-Ing. Dr.techn. W. Schneider vom Institut für Vermessungswesen und Fernerkundung

der Universität für Bodenkultur als Koautor maßgebend unterstützt. Er ist ausgebildeter Physiker und seit mehr als zehn Jahren in der Fernerkundung tätig. Er hat schwerpunktmäßig die Abschnitte 2., 3.2.1.3, 3.2.1.5, 3.4 und 3.5 verfaßt. Darüber hinaus haben wir die Manuskriptteile des jeweils anderen Autors kritisch gelesen und Verbesserungen angebracht, um dem Leser ein gemeinsam erarbeitetes und damit homogenes Manuskript auf dem Gebiet der Fernerkundung unterbreiten zu können.

Für die gegenseitige befruchtende Zusammenarbeit danke ich meinem Koautor, Herrn Dr. W. Schneider, an erster Stelle. Darüber hinaus haben Dozent Dr. G. Gerstbach zum Abschnitt 4.2.1, Dr. J. Jansa, Dipl.-Ing. R. Kalliany (insbesondere zu den Abschnitten 4.2.6 und 4.2.11) und Prof. Dr. P. Waldhäusl wertvolle Ergänzungen beigesteuert. Frau H. Emersberger hat auf dem Textverarbeitungssystem mit viel Engagement die Formelakrobatik bewältigt. Die meisten Zeichnungen stammen von den Studierenden G. Senftner und O. Fessler.

Wien, im Sommer 1988

Karl Kraus

Hinweise für den Leser: Die Hauptabschnitte und die hierarchisch gegliederten Unterabschnitte sind mit der Dezimalklassifikation numeriert. Die Formeln sind mit den ersten beiden Ziffern der Dezimalklassifikation versehen und innerhalb des jeweiligen Abschnittes fortlaufend numeriert. Die Formel (2.5-11) ist z.B. die 11. Formel im Abschnitt 2.5.... Ein Hinweis auf eine Formel ist in Klammern angegeben. Dagegen sind die Hinweise auf Bilder, Tabellen und Aufgaben nicht in Klammern gesetzt, aber nach dem gleichen Prinzip numeriert wie die Formeln. Die Aufgabe 3.1-4 ist z.B. die 4. Aufgabe im Abschnitt 3.1.... Bilder und Tabellen sind in die gleiche fortlaufende Nummerierung eingebunden, d.h. Bild 3.2-13 ist im Abschnitt 3.2... an 13. Position, wobei die 12 Positionen vorher mit Bildern und/oder Tabellen belegt sind.

Hinweise auf Abschnitte, Formeln, Bilder und Tabellen, deren erste Ziffer größer als 4. ist, beziehen sich auf Band 2 Fernerkundung. Hinweise auf Abschnitte, Formeln, Bilder und Tabellen, die vor der Dezimalklassifikationszahl einen Buchstaben enthalten, beziehen sich auf die im Vorwort zitierten Photogrammetrie-Bücher, wobei der Buchstabe A zum Band 1 gehört und die übrigen Buchstaben zum Band 2 gehören. Ein Hinweis A 3.3.4 bedeutet demnach den Abschnitt 3.3.4 im Band 1 Photogrammetrie.



<u>INHALTSVERZEICHNIS VON BAND 1:</u>	Seite
<u>1. EINLEITUNG</u>	7
1.1 Definitionen	7
1.2 Anwendungsmöglichkeiten	8
<u>2. EINIGE PHYSIKALISCHE VORBEMERKUNGEN</u>	10
2.1 Überblick über Fernerkundungssysteme	10
2.2 Elektromagnetische Strahlung	12
2.3 Grundlagen der Radiometrie	18
2.4 Ausbreitung und Absorption elektromagnetischer Strahlung in Materie	30
2.5 Reflexion elektromagnetischer Strahlung an der Geländeoberfläche	36
2.6 Thermische Emission von Strahlung	52
2.7 Wechselwirkung von elektromagnetischer Strahlung und Atmosphäre	60
<u>3. AUFNAHMESYSTEME (SENSOREN)</u>	74
3.1 Photographische Systeme	74
3.1.1 Meßkameras	74
3.1.1.1 Gerätetechnisches und Operationelles	74
3.1.1.2 Abbildungsschärfe	81
3.1.1.2.1 Tiefenschärfe	81
3.1.1.2.2 Linsenfehler	82
3.1.1.2.2 Beugungsunschärfe	82
3.1.1.2.4 Geometrisches Auflösungsvermögen	82
3.1.1.2.5 Bewegungsunschärfe	83
3.1.1.3 Die Kamera als Strahlungsmesser	86
3.1.1.4 Photographische Belange	94
3.1.1.4.1 Farben und Filter	94
3.1.1.4.2 Schwarzweiß-Photographie	99
3.1.1.4.3 Farbphotographie	104
3.1.1.4.4 Farbinfrarotphotographie	106
3.1.1.5 Spektrale Empfindlichkeit verschiedener Filmtypen und Zuordnung der entsprechenden Objektinformation	108
3.1.1.6 Charakteristika einiger Filme	112
3.1.1.7 Photographische Folgeprodukte	114
3.1.2 Multispektralkamera	116
3.2 Abtastsysteme (scanner)	119
3.2.1 Mechanische Abtaster (Rotationsabtaster)	119
3.2.1.1 Gerätetechnisches und Operationelles	119
3.2.1.2 Geometrisches Auflösungsvermögen und Kontrastübertragung	125
3.2.1.3 Charakterisierung von Detektorsystemen	139
3.2.1.4 Der Abtaster als Strahlungsmesser	146
3.2.1.5 Das Signal/Rauschverhältnis in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern	156

3.2.1.6 Die Thermalstrahlung und die Zuordnung der entsprechenden Objektinformationen	160
3.2.1.7 Gegenüberstellung photographischer Systeme und Abtaster	164
3.2.2 Digitale Zeilenkameras (opto-elektronische Abtaster)	165
3.3 Nichtphotographische Flächensensoren	172
3.4 Mikrowellensysteme	173
3.4.1 Einleitung	173
3.4.2 Mikrowellen-Radiometer	177
3.4.3 Aktive Mikrowellensysteme (RADAR)	187
3.4.3.1 Prinzip des Seitensicht-RADARs	187
3.4.3.2 Seitensicht-RADAR mit synthetischer Apertur	190
3.4.3.3 Geometrische Eigenschaften von RADAR-Bildern	195
3.4.3.4 Radiometrische Eigenschaften von RADAR-Bildern	197
3.4.3.5 Anwendungen von RADAR-Bilddaten	204
3.5 Terrestrische Erhebung von radiometrischen Referenzdaten zu optischen Fernerkundungsaufnahmen	206
3.5.1 Spektralradiometer	206
3.5.2 Meßanordnung	212
3.5.3 Ermittlung der optischen Dicke der Atmosphäre	215
3.5.4 Ermittlung des gerichteten Reflexionsgrades von Oberflächen	218
<u>4. DAS ANGEBOT UND DIE BESCHAFFUNG VON AUFNAHMEN</u>	220
4.1 Aufnahmen mit Flugzeugen	220
4.1.1 Photographische Aufnahmen	220
4.1.1.1 Flugplanung	220
4.1.1.2 Bildflugzeuge	226
4.1.1.3 Luftbildarchive	227
4.1.2 Aufnahmen mit Abtastern	227
4.1.3 Mikrowellen-Aufnahmen	228
4.2 Aufnahmen mit Satelliten	229
4.2.1 Bahnparameter	229
4.2.2 LANDSAT-1, 2 und 3	240
4.2.3 LANDSAT-4 und 5	247
4.2.4 SEASAT und Shuttle Imaging RADAR (SIR)	254
4.2.5 Heat Capacity Mapping Mission (HCMM)	256
4.2.6 Satelliten für die Meteorologie	256
4.2.7 MOMS mit Space Shuttle	259
4.2.8 Meßkameras im Space Shuttle	260
4.2.9 SPOT	263
4.2.10 Weitere Satelliten	272

4.2.11 Einige Zukunftsprogramme der Fernerkundung aus dem Weltraum	273
Anhang 2.3-1: Integration über die Richtungen des Halbraumes	282
Anhang 2.3-2: Photometrische Einheiten	283
Anhang 2.4-1: Ableitung des Lambert-Beer-Gesetzes	285
Anhang 2.7-1: Ableitung der Beziehung $V = 3.93/\beta_{\text{ext}}$	286
LITERATURHINWEISE	288
SACHREGISTER von Band 1	
Anzeigen von Geräteherstellern	



## INHALTSVERZEICHNIS VON BAND 2:

Auswertung photographischer und digitaler Bilder  
von Karl Kraus mit Beiträgen von J. Jansa und W. Schneider

### 5. AUSWERTUNG PHOTOGRAPHISCHER BILDER

- 5.1 Geometrische Auswertung von Meßbildern
  - 5.1.1 Das Meßbild als Karte
  - 5.1.2 Optische und photographische Entzerrung mittels zentralperspektivischer Umbildung
  - 5.1.3 Vereinfachte Zweibildauswertung
  - 5.1.4 Strenge Zweibildauswertung
    - 5.1.4.1 Mathematische Vorbemerkungen
    - 5.1.4.2 Analytische Auswertegeräte
    - 5.1.4.3 Analogauswertegeräte
    - 5.1.4.4 Topographische Informationssysteme
  - 5.1.5 Orthophotos und Stereoorthophotos
    - 5.1.5.1 Orthophotos und Stereoorthophotos aus Luftaufnahmen
    - 5.1.5.2 Orthophotos und Stereoorthophotos aus Satellitenaufnahmen
    - 5.1.5.3 Praxisorientierte Hinweise zur Orthophoto- und Stereoorthophotographie
  - 5.1.6 Phototriangulation
- 5.2 Geometrische Auswertung von Amateurbildern
- 5.3 Visuelle Interpretation photographischer Bilder
  - 5.3.1 Abgrenzung zu den Methoden der digitalen Bildauswertung
  - 5.3.2 Vorbereitungsarbeiten für eine visuelle Interpretation
  - 5.3.3 Interpretationsschlüssel und Interpretationstraining
  - 5.3.4 Flächenkartierung
  - 5.3.5 Einzelobjektinterpretation
  - 5.3.6 Stichprobenverfahren und Rastermethode
  - 5.3.7 Analyse der Interpretationsergebnisse

### 6. DIGITALE BILDVERARBEITUNG

- 6.1 Farbtheorie und Definitionen
  - 6.1.1 Bemerkungen zur Farbtheorie
    - 6.1.1.1 Der Farbwürfel
    - 6.1.1.2 Das IHS-System
    - 6.1.1.3 Das Farbdreieck

- 6.1.2 Definition eines digitalen Bildes
- 6.2 Entstehung digitaler Bilder
- 6.3 Wiedergabe digitaler Bilder
  - 6.3.1 Ausgabe auf einem Drucker
  - 6.3.2 Darstellung auf einem Farbbildschirm
  - 6.3.3 Ausgabe auf Film
  - 6.3.4 Drucktechnische Wiedergabe
- 6.4 Geometrische Rektifizierung
  - 6.4.1 Rektifizierung der aus Photographien entstandenen digitalen Bilder
  - 6.4.2 Rektifizierung der mit Abtastern in Flugzeugen aufgenommenen Bilder
    - 6.4.2.1 Panoramakorrektur und Zeilenschiefe
    - 6.4.2.2 Nichtparametrische Rektifizierung
    - 6.4.2.3 Ursachen der Verzerrungen in den Scanneraufnahmen
    - 6.4.2.4 Parametrische Rektifizierung
  - 6.4.3 Rektifizierung der mit Abtastern in Satelliten aufgenommenen Bilder
  - 6.4.4 Rektifizierung von RADAR-Bildern
- 6.5 Radiometrische Rektifizierung
  - 6.5.1 Korrektur atmosphärischer Einflüsse
  - 6.5.2 Korrektur von Blickrichtungseffekten
  - 6.5.3 Wirkung der Differenz- und Verhältnisbildung von Bildkanälen
  - 6.5.4 Berücksichtigung von Detektor-Nichtlinearitäten
  - 6.5.5 Radiometrische Rektifizierung im Falle breiter spektraler Empfindlichkeitsbereiche der Detektoren
- 6.6 Grauwertoperationen
  - 6.6.1 Kontrast- und Helligkeitsveränderung
  - 6.6.2 Äquidensiten
  - 6.6.3 Farbcodierung
  - 6.6.4 Differenzieren von Bildern
- 6.7 Filterung
  - 6.7.1 Filterung im Ortsbereich
  - 6.7.2 Spektralanalyse
  - 6.7.3 Filterung im Frequenzbereich
  - 6.7.4 Zusammenhang zwischen Filterung im Orts- und der im Frequenzbereich
  - 6.7.5 Entwurf eines Filters
- 6.8 Multispektrale Klassifizierung
  - 6.8.1 Mehrdimensionaler Merkmalsraum
  - 6.8.2 Klassifizierung mittels kürzester Entfernung

- 6.8.3 Klassifizierung mittels Quader
- 6.8.4 Statistische Analyse von Multispektralbildern
  - 6.8.4.1 Statistische Beschreibung einer Objektklasse
  - 6.8.4.2 Statistische Beschreibung für alle Objektklassen
  - 6.8.4.3 Hauptkomponententransformation
- 6.8.5 Klassifizierung mittels maximaler Mutmaßlichkeit
- 6.8.6 Modifizierte und/oder zusätzliche Kanäle für die Klassifizierung
- 6.8.7 Selbstlernende Klassifizierung
- 6.8.8 Nachbehandlung des Klassifizierungsergebnisses
- 6.8.9 Anwendungs- und EDV-orientierte Hinweise
- 6.9 Mustererkennung
- 6.10 Korrelation
- 6.11 Digitale Bildverarbeitungsanlagen

#### LITERATURHINWEISE

#### SACHREGISTER von Band 1 und 2



## 1. EINLEITUNG

### 1.1 Definitionen

Seit den 60er Jahren liefert die Weltraumfahrt Informationen über die Erde. Für diese indirekte Gewinnung von Informationen aus der Ferne wurde um diese Zeit in einem Zentrum der Weltraumfahrt, den Vereinigten Staaten von Amerika, der Begriff "Remote Sensing" geprägt, der später mit Fernerkundung übersetzt wurde. Obwohl ursprünglich nur für die Informationsgewinnung aus dem Weltraum mit Satelliten und anderen Raumfahrzeugen beschränkt, hat sich der Begriff Fernerkundung im Laufe der Zeit auch für die Informationsgewinnung aus Flugzeugen eingebürgert. Heute versteht man unter Fernerkundung die Gewinnung von Information über Art und Eigenschaften entfernter Objekte.

Die Fernerkundung schließt definitionsgemäß auch die Photogrammetrie und die Photointerpretation ein, allerdings nur jenen Anteil, der sich auf Flugzeugaufnahmen stützt. Unter Photogrammetrie versteht man eine Meßmethode, mit der Lage, Größe und Form von Objekten aus Photographien rekonstruiert werden. Die Photointerpretation ist auf die (visuelle) Deutung des Bildinhaltes ausgerichtet.

Die beiden wesentlich älteren Begriffe Photogrammetrie und Photointerpretation wurden aber noch nicht verdrängt; insbesondere wird man noch sehr lange von Photogrammetrie sprechen, wenn die Erfassung der geometrischen Objektparameter im Mittelpunkt des Interesses steht. Für die Ermittlung nichtgeometrischer Parameter aus Flugzeug- und Satellitenaufnahmen ist dagegen der Begriff Fernerkundung sehr gebräuchlich; von Photointerpretation spricht man immer weniger.

Die Grundlagen der Photogrammetrie sind geometrische und mathematische Gesetze; die Grundlagen der Fernerkundung sind physikalische Gesetze. Aus diesem Grund wurde in diesem Buch ein physikalischer Einstieg und in den im Vorwort erwähnten Photogrammetrie-Büchern ein mathematischer Einstieg gewählt.

Die ersten Aufnahmen aus dem Weltraum waren Photographien. Für eine systematische Aufnahme der Erde mit unbemannten Satelliten mußte ein Sensor gefunden werden, der auch eine nachrichtentechnische Übertragung der empfangenen Informationen erlaubt. Zeilenweise abtastende Systeme (scanner) erfüllen diese wichtige Forderung. Der erste mit einem Abtaster ausgestattete Satellit kam 1972 unter der Bezeichnung ERTS-1 (earth

resources technology satellite) in den Weltraum; er wurde später in LANDSAT-1 umbenannt. Dieser Satellit und die Folgesatelliten dieser Type haben inzwischen mehr als 1 Million Szenen aufgenommen, wobei eine Szene  $185 \times 185 \text{ km}^2$  überdeckt.

Die nichtphotographischen Sensoren dominieren im Weltraum; in Flugzeugen werden - von einigen Ausnahmen abgesehen - photographische Systeme eingesetzt. Die photographischen Bilder werden vorwiegend visuell interpretiert. Dabei spielt die gesamtheitliche Betrachtungsweise des menschlichen Interpreten im Stereomodell eine wichtige Rolle. Die nichtphotographischen Bilder fallen in digitaler Form an. Aus diesem Grund und wegen zusätzlicher Möglichkeiten werden nichtphotographische Bilder heute immer mehr mit den Methoden der digitalen Bildverarbeitung ausgewertet. Inzwischen existieren auch die Voraussetzungen zur Umwandlung photographischer Bilder in digitale Bilder und umgekehrt, sodaß auch Kombinationen der verschiedenen Auswertungsverfahren möglich sind.

## 1.2 Anwendungsmöglichkeiten

Die ursprünglichen Intentionen, die zur Entwicklung der Fernerkundung geführt haben, waren - neben den militärischen Anwendungen, die hier bewußt außer Acht gelassen werden - vor allem das Management und die Überwachung der auf der Erde vorhandenen und nicht beliebig vermehrbaren Ressourcen. Seit etwa 1975 ist der Umweltaspekt hinzugekommen. Für eine großräumige Erfassung wichtiger Umweltparameter - insbesondere der Vitalität der Vegetation sowie der Anreicherung der Gewässer und der Luft mit Schadstoffen - kommen vor allem Luft- und Weltraumaufnahmen in Frage. Der Einsatz der Fernerkundung für diese Fragestellungen führt sowohl in räumlicher als auch in zeitlicher Hinsicht zu homogenen Ergebnissen. Die dritte, erst in den letzten Jahren in den Vordergrund getretene Anwendungsmöglichkeit der Fernerkundung ist die Überwachung von Katastrophen verschiedener Ausprägung.

Ohne Anspruch auf Vollständigkeit sollen einige konkrete Anwendungsmöglichkeiten der Fernerkundung stichwortartig aufgezählt werden:

- Großräumige Erfassung der landwirtschaftlichen Nutzung und ihrer Veränderung z.B. für Ernteprognosen.
- Erhebung der bebauten Gebiete.
- Geologische, geomorphologische und bodenkundliche Kartierungen (synoptischer Überblick!).

- Herstellung und Laufendhaltung topographischer Karten und digitaler Geländemodelle, insbesondere in der Dritten Welt.
- Großräumige Erfassung kurzzeitiger Veränderungen wie z.B. der Schneebedeckung.
- Flächenhafte Temperaturmessungen (z.B. Temperaturgang in Städten zwischen Tag und Nacht).
- Überwachung der Meeres- und Eisströme.
- Feststellung der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung über den Ozeanen.
- Wetterbeobachtung.
- Ermittlung der Zusammensetzung der Atmosphäre.
- Erfassung des Vitalitätszustandes der Vegetation, insbesondere der Waldschäden.
- Umweltverträglichkeitsprüfung in Zusammenhang mit größeren Bauprojekten. (Die Fernerkundung wird dabei zur Iststandserhebung eingesetzt.)
- Feststellung der Ausbreitung thermischer Abwässer in Flüssen und Seen.
- Beweissicherung aus älteren Luft- und Satellitenaufnahmen. (Z.B. Aufzeigen der historischen Entwicklung von Mülldeponien.)
- Überwachung von Überschwemmungen, Waldbränden und sonstigen Katastrophen.
- Kartierung anderer Planeten.

## 2. EINIGE PHYSIKALISCHE VORBEMERKUNGEN

### 2.1 Überblick über Fernerkundungssysteme

In der Fernerkundung erfolgt die Übertragung der Informationen vom untersuchten Objekt (Erdoberfläche oder Atmosphäre) zum Sensor (im Flugkörper) durch elektromagnetische Strahlung.

Im Bild 2.1-1 ist die grundsätzliche Situation bei Fernerkundungsaufnahmen skizziert. Es kommen im wesentlichen folgende Strahlungspfade vor:

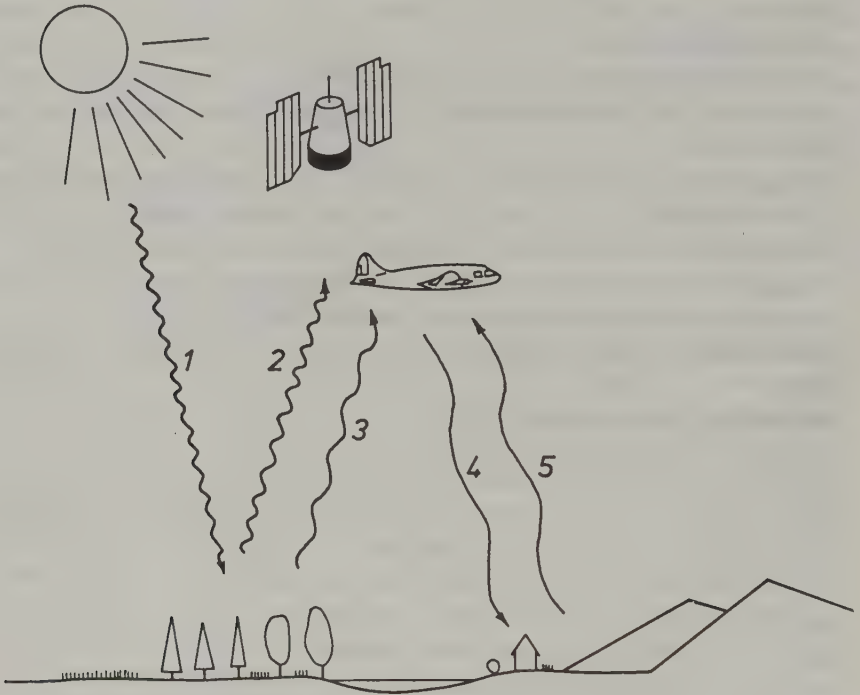


Bild 2.1-1: Strahlungspfade der Fernerkundung

Fall a: Von einer natürlichen Quelle - meist von der Sonne - kommende Strahlung (1) fällt auf die Erdoberfläche und wird hier teilweise reflektiert. Die reflektierte Strahlung (2) trägt Informationen über Art und Eigenschaften der Oberfläche zu einem Sensor auf der Fernerkundungsplattform (Flugzeug oder Satellit). Hier wird die Strahlung vom Sensor erfasst und gemessen.

Fall b: Die Erdoberfläche und die darauf befindlichen Objekte emittieren



von sich aus Strahlung (3), welche Informationen über Art und Eigenschaften der emittierenden Objekte zum Fernerkundungssensor trägt.

Fall c: Eine im Flugzeug oder im Satellit neben dem Sensor eingebaute Strahlungsquelle sendet Strahlung (4) zur Erdoberfläche. Diese Strahlung wird, wie im Fall a, teilweise reflektiert (rückgestreut) (5) und trägt Informationen über Art und Eigenschaften der reflektierenden Oberfläche zum Sensor.

Fernerkundungssysteme, die entsprechend den Fällen a und b ausschließlich mit natürlicher Strahlung arbeiten, nennt man passive Fernerkundungssysteme. Demgegenüber spricht man im Fall c, in dem die zur Erkundung dienende Strahlung künstlich erzeugt wird, von aktiven Fernerkundungssystemen.

An Hand des Bildes 2.1-1 sind nun deutlich folgende Problemkreise zu erkennen und abzugrenzen, die man genauer diskutieren muß, um zu einem tieferen Verständnis des Aufnahmeprozesses zu kommen:

- Was ist elektromagnetische Strahlung? Was sind ihre Eigenschaften? Welche Arten elektromagnetischer Strahlung (aus natürlichen und künstlichen Quellen) stehen uns für Fernerkundungszwecke prinzipiell zur Verfügung?
- Wie können Strahlungsvorgänge quantitativ beschrieben werden?
- Wie sind die Wechselwirkungsmechanismen zwischen elektromagnetischer Strahlung und Objekten der Erdoberfläche? Inwiefern können wir erwarten, durch Messung und Analyse der reflektierten (rückgestreuten) und der emittierten Strahlung Informationen über die reflektierenden und emittierenden Oberflächen und Objekte zu erhalten?
- Welche Wechselwirkungen bestehen zwischen elektromagnetischer Strahlung und durchlaufener Atmosphäre? Inwiefern wird die von der Erdoberfläche zum Sensor im Flugkörper laufende Strahlung beim Durchgang durch die Atmosphäre von dieser beeinflusst?
- Welche Instrumente werden für die passive und für die aktive Fernerkundung eingesetzt? Welche Sensorsysteme stehen uns zur Verfügung, um die informationsübermittelnde elektromagnetische Strahlung aufzufangen, zu messen und die Meßwerte zu speichern?

Diese und weiterführende Fragen werden im vorliegenden Kapitel erörtert, soweit es für einen ersten Überblick, für eine vergleichende Betrachtung der verschiedenen Fernerkundungssysteme sowie als Grundlage für die folgenden Kapitel des Buches wichtig erscheint.

## 2.2 Elektromagnetische Strahlung

Zum Verständnis der Eigenschaften elektromagnetischer Strahlung und ihrer Wechselwirkung mit Materie ist es notwendig, einige Grundtatsachen der Physik in Erinnerung zu rufen:

- a) Gewisse Körper (Teilchen) haben die Eigenschaft, "elektrische Ladung" zu besitzen. Diese Körper verändern den sie umgebenden Raum; sie erzeugen ein "elektrisches Feld". Ein elektrisches Feld übt eine Kraft auf jede im Feld befindliche elektrische Ladung aus.
- b) Bewegte elektrische Ladungen ("elektrische Ströme") rufen neben dem elektrischen Feld noch eine weitere Veränderung des umgebenden Raumes hervor: Sie erzeugen ein "magnetisches Feld". Ein magnetisches Feld übt eine Kraft auf jede im Feld befindliche bewegte elektrische Ladung aus.
- c) Ein sich zeitlich veränderndes elektrisches Feld erzeugt ein magnetisches Feld.
- d) Ein sich zeitlich veränderndes magnetisches Feld erzeugt ein elektrisches Feld.

Wird nun ein Körper mit elektrischer Ladung beschleunigt (führt er z.B. eine Schwingung aus), so erzeugt er sowohl ein sich veränderndes elektrisches Feld als auch - da die beschleunigte elektrische Ladung einen sich verändernden elektrischen Strom darstellt - ein sich veränderndes magnetisches Feld. Diese sich verändernden elektrischen und magnetischen Felder rufen ihrerseits sich verändernde magnetische und elektrische Felder hervor usw., sodaß es in Summe zu einer Energiefortpflanzung in Form verketteter elektrischer und magnetischer Felder mit zeitlich und örtlich variierender Feldstärke kommt. Die Vektoren der elektrischen und der magnetischen Feldstärke stehen dabei in jedem Punkt des Raumes senkrecht auf der Richtung der Energieausbreitung und senkrecht aufeinander. Die Energieausbreitung

erfolgt mit Lichtgeschwindigkeit:

$$c = 2.998 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (2.2-1)$$

in Vakuum.

Im Falle einer harmonischen Schwingung (Sinusschwingung) der Ladungen in der Strahlungsquelle erhält man eine elektromagnetische Welle mit zeitlich und örtlich sinusförmiger Verteilung: Im Bild 2.2-1 ist die Ortsabhängigkeit zu einem bestimmten Zeitpunkt veranschaulicht. Man hat sich nun vorzustellen, daß sich diese Verteilung mit der Geschwindigkeit  $c$  in Ausbreitungsrichtung bewegt. An jedem beliebigen Ort  $x = x_0$  ist dann eine in der Zeit sinusförmige Verteilung der Feldstärken gegeben.

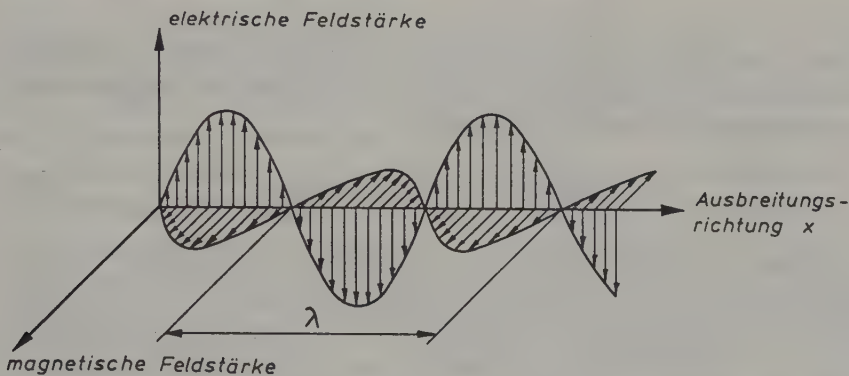


Bild 2.2-1: Elektromagnetische Welle zu einem bestimmten Zeitpunkt

Wichtige Parameter einer solchen Welle sind die Wellenlänge  $\lambda$  (der Abstand zweier benachbarter Punkte gleicher Phase, d.h. gleichen Schwingungszustandes, z.B. zweier benachbarter Wellenberge, Wellentäler oder Nulldurchgänge der oszillierenden Größen) sowie die Frequenz  $\nu$  (die Anzahl der Oszillationen in der Zeiteinheit, gemessen in Hertz =  $\text{s}^{-1}$ ). Der pro Sekunde zurückgelegte Weg der Welle (genauer: eines Punktes gleicher Phase) beträgt  $\nu \cdot \lambda$ , also gilt:

$$c = \nu \cdot \lambda$$

(2.2-2)

Die bisher skizzierte Darstellung der Energieausbreitung durch oszillieren-

de verkettete elektrische und magnetische Felder kann nur als Modellvorstellung der Realität gewertet werden. Es gibt Erscheinungen, vor allem bei der Wechselwirkung elektromagnetischer Strahlung mit Materie, die mit diesem Wellenmodell nicht im Einklang stehen: So ist z.B. bei der Messung "kurzwelliger" elektromagnetischer Strahlung geringer Intensität mit hinreichend empfindlichen Detektoren zu bemerken, daß die Strahlung nicht kontinuierlich, sondern in Form von "Energiepaketen" auf den Detektor auftrifft. Dieser Beobachtung angepaßt ist das Teilchenmodell (Korpuskelmodell) der elektromagnetischen Strahlung, wonach man sich die Energieausbreitung in Form von Teilchen ("Photonen") vorzustellen hat, die mit Lichtgeschwindigkeit dahinfliegen und von denen jedes die Energie

$$Q = h \cdot \nu \quad (2.2-3)$$

trägt.  $\nu$  ist hier wieder die Frequenz der Strahlung, womit die Verbindung zum Wellenmodell hergestellt ist;  $h$  ist das "Plancksche Wirkungsquantum", eine fundamentale physikalische Größe:

$$h = 6.625 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \text{ (Joule} \cdot \text{Sekunden)} \quad (2.2-4)$$

Die gemäß Gleichung (2.2-3) zu ermittelnde Photonenenergie in Joule (Watt·Sekunden) ist eine sehr kleine, wenig einprägsame Größe. Man verwendet daher zur Angabe der Photonenenergie  $Q$  bevorzugt die Einheit "Elektronenvolt" [eV], definiert als Energie, die ein Elektron beim Durchlaufen eines Spannungsgefälles (einer Potentialdifferenz) von 1 Volt erhält. Es gilt:

$$1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ J} \quad (2.2-5)$$

Für die folgenden Erörterungen und für die praktische Arbeit in der Fernerkundung ist es hinreichend, das Wellenmodell und das Teilchenmodell der Strahlung gleichberechtigt nebeneinander bestehen zu lassen und sich jeweils desjenigen Modells zu bedienen, das für ein konkretes Problem besser anwendbar erscheint: Im allgemeinen tritt der Teilchencharakter der Strahlung bei kürzeren Wellenlängen sowie bei der Wechselwirkung mit Materie eher hervor als bei längeren Wellenlängen und bei der Ausbreitung im freien

Raum, wo die Wellennatur im Vordergrund steht.<sup>1</sup>

Es gibt elektromagnetische Strahlung unterschiedlichster Wellenlängen (Frequenzen, Photonenenergien), wobei die Strahlung je nach Wellenlänge unterschiedliche Eigenschaften hat und auch unterschiedlich benannt wird: Bild 2.2-2 zeigt das elektromagnetische Spektrum über etwa 17 Zehnerpotenzen hinweg. Auf den senkrechten Achsen sind hier Wellenlänge  $\lambda$ , Frequenz  $\nu$  und Photonenenergie  $Q$  in logarithmischer Teilung aufgetragen. Neben der Schreibweise in Zehnerpotenzen sind auch die üblichen Bezeichnungen mit Vorsätzen zum Bilden der dezimalen Vielfachen und Teile (Kilo(k), Mega(M), Giga(G), Tera(T) bzw. Milli(m), Mikro( $\mu$ ), Nano(n), Piko(p)) angegeben. In der rechten Hälfte des Diagramms sind die Bezeichnungen der einzelnen Bereiche des elektromagnetischen Spektrums angeführt. Die Übergänge zwischen diesen Bereichen sind zum Teil fließend.

Eine bestimmte Strahlungsart kann nur dann für Fernerkundungszwecke eingesetzt werden, wenn die Atmosphäre für diese Strahlung weitgehend durchlässig ist. Im Bild 2.2-2 ist für einen ersten Überblick auch die Durchlässigkeit der Atmosphäre angegeben: Ein Transmissionsgrad  $\tau = 0$  besagt, daß die Atmosphäre für Strahlung der betreffenden Wellenlänge undurchlässig ist. (Diese Strahlungsabblockung ist im Bild 2.2-2 in Schwarz veranschaulicht.) Der Transmissionsgrad  $\tau = 1$  bedeutet völlige Durchlässigkeit der Atmosphäre. Die Transmissionswerte zwischen 0 und 1 geben den Bruchteil der Strahlungsintensität an, der bei vertikaler Strahlrichtung das gesamte Luftvolumen von der Erdoberfläche bis zur Obergrenze der Atmosphäre (oder umgekehrt) ungestört durchsetzt.

Bei sehr kurzwelliger elektromagnetischer Strahlung (bis etwa 10 nm) spricht man von Röntgenstrahlung oder Gammastrahlung, je nachdem, ob die Strahlung künstlich mit elektrischen Geräten erzeugt wird (Röntgenstrahlung) oder aber aus dem Atomkern kommt (Gammastrahlung). Da in diesem Bereich der Teilchencharakter dominiert, ist die Angabe von Wellenlänge bzw. Frequenz eher ungebräuchlich; es wird vielmehr die Energie der Teilchen - üblicherweise in Elektronenvolt [eV] - angegeben. Die Atmosphäre ist für natürlich vorkommende Gammastrahlung, die von jedem Gestein und von jedem

<sup>1</sup> Der Vollständigkeit halber sei noch erwähnt, wie die moderne Physik (Quantenphysik) die Vorstellungen von Wellenfeldern und Teilchen vereinheitlicht: Die einem Teilchen zugeschriebene Welle (genauer: das Quadrat ihrer Amplitude) gibt die Wahrscheinlichkeit an, das Teilchen an einem bestimmten Ort anzutreffen.



Boden im Photonenenergiebereich zwischen etwa 0.2 MeV und 2.5 MeV emittiert wird, weitgehend undurchlässig, wie im Bild 2.2-2 angedeutet ist. Eine Luftschicht der Dicke 90 m schwächt Gammastrahlung von 1 MeV Photonenenergie bereits um einen Faktor 2 ab (Halbwertsdicke). Fernerkundung mit Gammastrahlen kann daher nur von niedrigen Flughöhen (bis maximal wenige hundert Meter Höhe) betrieben werden.

An den Bereich der Röntgen- und Gammastrahlung schließt der Bereich der Ultraviolettstrahlung an. Die Atmosphäre ist hier bis zu einer Wellenlänge von etwa 250 nm völlig undurchlässig: Versuche mit dieser Strahlung können nur im Vakuum durchgeführt werden. Auch in dem schmalen Ultraviolettbereich zwischen 250 nm und 400 nm, in dem die Luft teilweise transparent ist und in den auch der biologisch wirksame UV-Anteil der Sonnenstrahlung fällt, ist die Streuung in der Luftschicht so stark, daß ein Einsatz für Fernerkundungszwecke nur in Ausnahmefällen in Frage kommt.

Der an das Ultraviolette anschließende schmale Strahlungsbereich von etwa 400 nm bis 700 nm Wellenlänge ist dadurch ausgezeichnet, daß der Mensch diese Strahlung mit einem Sinnesorgan direkt erfassen kann: Wenn Strahlung aus diesem Wellenlängenintervall in unser Auge fällt, empfinden wir Licht, und zwar - je nach Wellenlänge - Licht verschiedener Farbe, von Violett am kurzwelligen Ende über Blau, Grün, Gelb und Orange bis Rot am langwelligen Ende dieses Spektralbereichs. Die Empfindlichkeit des menschlichen Auges ist für Wellenlängen unter 400 nm bzw. über 700 nm nicht Null, sondern nähert sich nur allmählich dem Wert Null. Wegen des fließenden Überganges werden die Grenzen des sichtbaren Lichtes bisweilen auch mit 380 nm und 780 nm angegeben. Die Atmosphäre ist im Bereich "sichtbares Licht" weitgehend transparent.

Im anschließenden Infrarot-Bereich, der von 700 nm bis etwa 1 mm Wellenlänge reicht, folgen abwechselnd schmale Intervalle der Transparenz und der Undurchlässigkeit der Atmosphäre aufeinander. Man spricht von "atmosphärischen Fenstern" im Spektrum. Fernerkundung kann selbstverständlich nur innerhalb dieser atmosphärischen Fenster betrieben werden.

Der Infrarot-Bereich wird weiter unterteilt in das nahe Infrarot (0.7  $\mu\text{m}$  bis 1.3  $\mu\text{m}$ ), das mittlere Infrarot (1.3  $\mu\text{m}$  bis 3.0  $\mu\text{m}$ ) und das ferne oder thermische Infrarot (7  $\mu\text{m}$  bis 15  $\mu\text{m}$ ). Diese Einteilung mit der hier angegebenen Abgrenzung hat sich in der Fernerkundung eingebürgert, obwohl die Grenzen in anderen Disziplinen zum Teil anders gelegt werden.

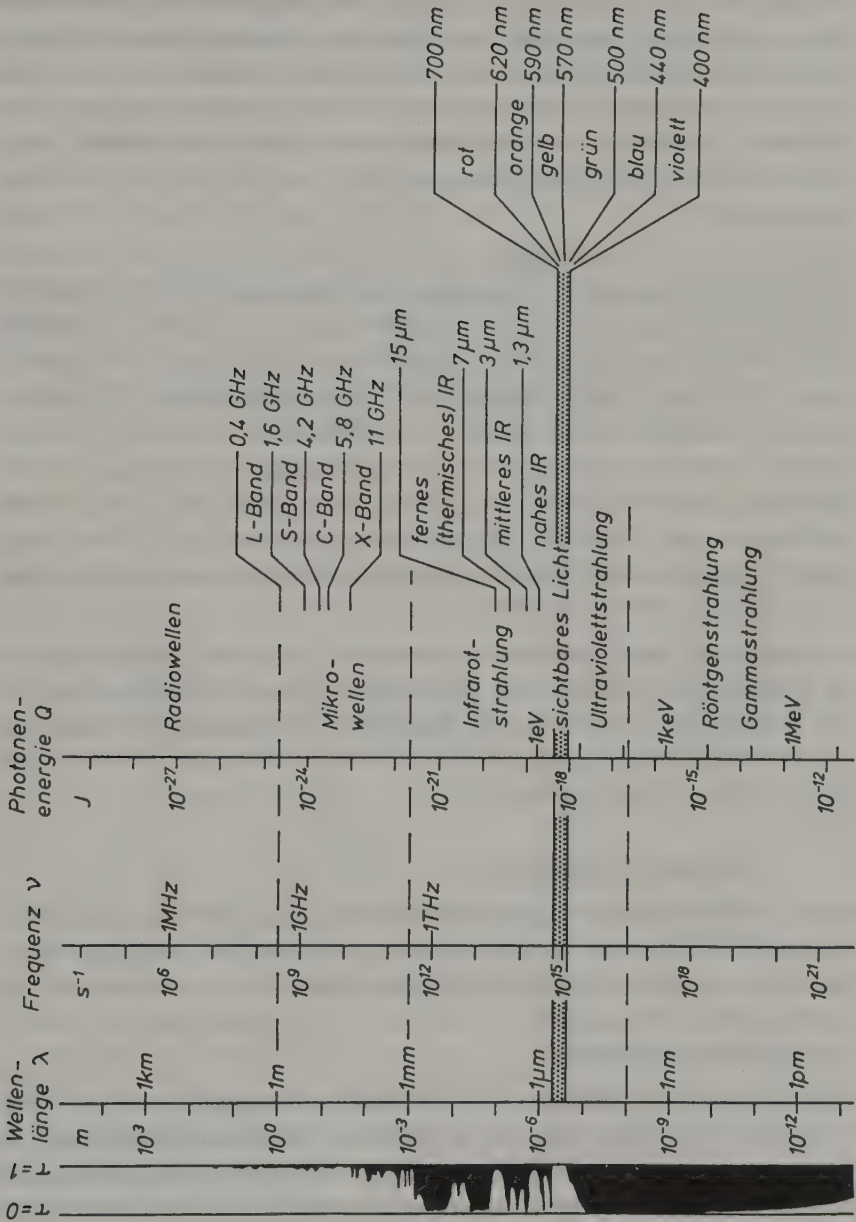


Bild 2.2-2: Elektromagnetisches Spektrum

Die Bereiche des sichtbaren Lichts und der Infrarot-Strahlung bilden zusammen den Bereich der "optischen Strahlung". (Zur Sammlung, Beeinflussung und Weiterleitung dieser Strahlung werden "optische" Komponenten wie Linsen, Prismen, Gitter, Spiegel usw. verwendet; die Strahlungsmessung erfolgt mit "optischen" Detektoren wie photographischen Filmen, Photodioden usw.). Dieses Buch befaßt sich zum Überwiegenden Teil mit Methoden der "optischen" Fernerkundung.

Die auf das Infrarot folgenden Mikrowellen durchdringen die Atmosphäre weitgehend ungeschwächt. Die atmosphärische Transparenz ist für diese Wellenlängen im allgemeinen sogar bedeutend höher als etwa für sichtbares Licht. (Mikrowellen finden u.a. in Radarsystemen Verwendung, von denen ja bekannt ist, daß sie für Navigationszwecke auch unter ungünstigen Wetterbedingungen eingesetzt werden können.) Die Mikrowellentechnik gehört zum Gebiet der Hochfrequenztechnik; künstliche Erzeugung, Aussendung, Sammlung und Messung dieser Strahlung erfolgen mit elektrischen und elektronischen Instrumenten und Bauteilen. Mikrowellen-Fernerkundung (vor allem Radar-Fernerkundung) wird heute noch in sehr beschränktem Umfang praktisch eingesetzt, gewinnt jedoch zunehmend an Bedeutung.

Am langwelligen Ende des Mikrowellenspektrums schließen letztendlich die für Rundfunkzwecke eingesetzten Hochfrequenzen sowie Niederfrequenzen bis hin zu statischen elektrischen und magnetischen Feldern an. Ihr Einsatz für Fernerkundungszwecke ist auf wenige spezielle Anwendungen beschränkt und wird hier nicht weiter verfolgt.

### 2.3 Grundlagen der Radiometrie

Da wir in der Fernerkundung mit elektromagnetischer Strahlung quantitativ arbeiten wollen, müssen wir uns mit den Grundlagen der Strahlungsmessung (Radiometrie) auseinandersetzen und insbesondere die wichtigsten physikalischen Größen, Dimensionen und Einheiten zur quantitativen Beschreibung von Strahlung kennenlernen.

Man kann sich die Strahlung als ein Strömen von Energie vorstellen, wobei ein wesentlicher Unterschied zum Strömen einer Flüssigkeit darin liegt, daß in jedem Punkt des Raumes Energie in verschiedene Richtungen gleichzeitig fließen kann, ohne daß diese Energieströme einander gegenseitig beeinflussen.

Die folgenden Überlegungen im Hinblick auf die Richtungsverteilung der Strahlung werden vereinfacht, wenn wir das Konzept des "Raumwinkels" einführen: Ein Raumwinkel ist durch ein "Richtungsintervall" gegeben, durch eine Gesamtheit von Richtungen, die von einem Punkt, dem Scheitel des Raumwinkels, ausgehen. So wie ein ebener Winkel durch die Länge des Bogens angegeben werden kann, den die Winkelschenkel aus einem Einheitskreis heraus-schneiden (Einheit: 1 Radiant =  $57.30^\circ = 63.66 \text{ gon}$ ), ist ein "Raumwinkel"  $\Omega$  durch die Fläche  $F_1$  jener Kugelkalotte charakterisiert, welche der den Raumwinkel umschließende Kegel aus einer Einheitskugel herausschneidet (Bild 2.3-1). Die Einheit des Raumwinkels  $\Omega$  ist ein Steradian [sr]. Ein Raumwinkel hat die Größe 1 sr, wenn er aus der Einheitskugel eine Fläche  $F_1 = 1$  herausschneidet. Die Größe eines Raumwinkels, der aus einer Kugel mit dem Radius  $r$  eine Kugelkalotte der Fläche  $F$  herausschneidet, ist

$$\Omega = \frac{F}{r^2} \quad (2.3-1)$$

Der alle Richtungen des Raumes umfassende Raumwinkel hat die Größe  $4\pi \text{ sr}$  und der Halbraum hat die Größe  $2\pi \text{ sr}$ .

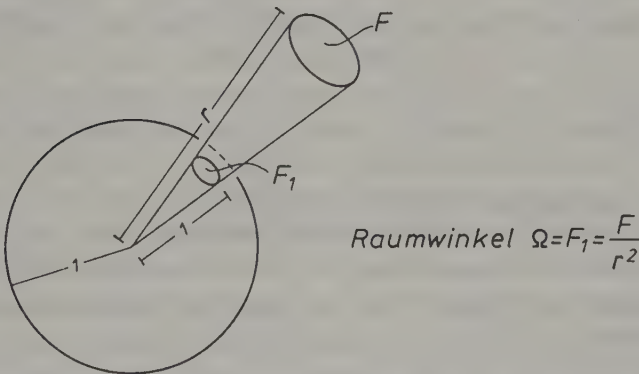


Bild 2.3-1: Definition des Raumwinkels

Die grundlegende Größe in der Radiometrie ist der Strahlungsfluß  $\Phi$  (Bild 2.3-2), definiert als die durch einen bestimmten Querschnitt  $F$  in ein bestimmtes Richtungsintervall (Raumwinkel  $\Omega$ ) sich fortplanzende Strahlungsleistung (Strahlungsenergie  $Q$  (2.2-3) für die Gesamtheit der Photonen



pro Zeiteinheit). Die Dimension des Strahlungsflusses  $\Phi$  ist dementsprechend Energie/Zeit = Leistung; die Einheit des Strahlungsflusses ist das Watt [W].

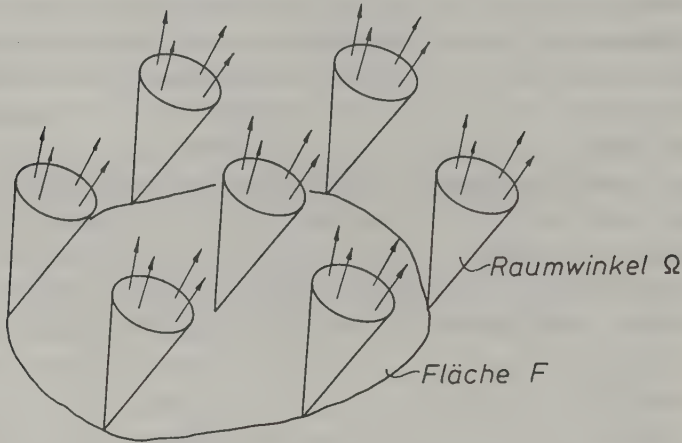


Bild 2.3-2: Zur Illustration des Begriffs " Strahlungsfluß "

Der Strahlungsfluß  $\Phi$  ist also eine integrale Größe, die für eine konkrete endliche Fläche und einen konkreten endlichen Raumwinkel angegeben wird. Zur Beschreibung einer örtlich und richtungsmäßig variierenden Strahlungsverteilung ist es nun nicht zielführend, den durch einen bestimmten Punkt in eine bestimmte Richtung sich ausbreitenden Strahlungsfluß angeben zu wollen, da diese Strahlungsleistung gleich Null ist. Man kann jedoch entsprechende Dichtegrößen definieren, wobei man den durch ein kleines Flächenelement und/oder in einen kleinen Raumwinkel sich fortpflanzenden Strahlungsfluß durch diese Fläche bzw. diesen Raumwinkel dividiert: Der Quotient strebt bei Verkleinerung der Fläche bzw. des Raumwinkels einem Grenzwert zu.

Zunächst betrachten wir den gesamten durch ein (differentielles) Flächenelement  $dF$  hindurchtretenden (differentiellen) Strahlungsfluß  $d\Phi$  (d.h. wir wählen als Raumwinkel  $\Omega$  den gesamten Halbraum) und bilden den Quotienten aus Strahlungsfluß und Flächenelementgröße. Wir erhalten auf diese Weise eine von der Flächengröße unabhängige Strahlungskennzahl, die in der Physik Strahlungsflußdichte oder Intensität heißt. In der Fernerkundung sind für diese Größe zwei verschiedene Bezeichnungen und auch Symbole gebräuchlich:

Fällt ein Strahlungsfluß  $d\Phi$  aus dem Halbraum auf ein Oberflächenelement  $dF$  auf (Bild 2.3-3a), so nennt man

$$E = d\Phi/dF \quad (2.3-2)$$

die Bestrahlungsstärke (irradiance). Strahlt das Oberflächenelement  $dF$  die Leistung  $d\Phi$  in den Halbraum ab (Bild 2.3-3b), so heißt

$$M = d\Phi/dF \quad (2.3-3)$$

die spezifische Ausstrahlung (radiant exitance). Die Einheit von Bestrahlungsstärke und spezifischer Ausstrahlung ist Watt pro Quadratmeter [ $W \cdot m^{-2}$ ]. Bestrahlungsstärke und spezifische Ausstrahlung einer Oberfläche sind im allgemeinen ortsabhängig, d.h.  $E = E(x,y)$ ,  $M = M(x,y)$ .

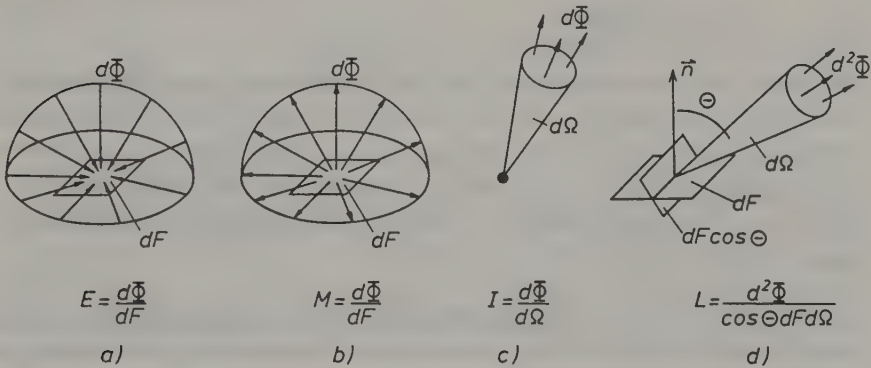


Bild 2.3-3: Bestrahlungsstärke  $E$ , spezifische Ausstrahlung  $M$ , Strahlstärke  $I$  und Strahldichte  $L$

Als nächstes betrachten wir den gesamten von einem Körper ausgehenden, in ein (differentielles) Raumwinkelement  $d\Omega$  tretenden (differentiellen) Strahlungsfluß  $d\Phi$ . Diese Betrachtungsweise ist vor allem dann sinnvoll, wenn wir uns in großer Entfernung von einer Strahlungsquelle befinden, d.h. wenn wir eine punktförmige Strahlungsquelle annehmen können (Bild 2.3-3c). Der Quotient aus Strahlungsfluß  $d\Phi$  und Raumwinkel  $d\Omega$  ergibt die Strahlstärke (radiant intensity)

$$I = d\Phi/d\Omega \quad (2.3-4)$$

Die Einheit der Strahlstärke ist Watt pro Steradian [ $\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$ ]. Die Strahlstärke ist im allgemeinen richtungsabhängig, d.h.  $I = I(\theta, \phi)$ , wobei  $\theta$  und  $\phi$  zwei ebene Winkel sind, die eine Richtung im Raum charakterisieren (z.B. Zenitwinkel und Horizontalwinkel wie im Bild 2.5-5 angegeben).

Schließlich betrachten wir eine Dichtegröße, die sowohl auf die Fläche als auch auf den Raumwinkel bezogen ist. Dabei gehen wir von einem (differentiellen) Flächenelement  $dF$  und einem (differentiellen) Raumwinkelement  $d\Omega$  aus (Bild 2.3-3d). Das Raumwinkelement  $d\Omega$  wird in die Richtung  $(\theta, \phi)$  angenommen. Diese Richtung schließe mit der Flächennormalen  $\vec{n}$  von  $dF$  den Winkel  $\theta$  ein. Der auf das Flächen- und Raumwinkelement bezogene (differentielle) Strahlungsfluß  $d^2\Phi$  ist die Strahldichte (radiance), die folgendermaßen definiert ist:

$$L = \frac{d^2\Phi}{\cos\theta \cdot dF \cdot d\Omega} \quad (2.3-5)$$

Die Einheit der Strahldichte ist Watt pro Quadratmeter und pro Steradian [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ ]. Man beachte, daß  $dF \cdot \cos\theta$  die Projektion des Flächenelements  $dF$  auf die senkrecht zur Ausstrahlungsrichtung liegende Ebene, also die in Ausstrahlungsrichtung  $(\theta, \phi)$  gesehene scheinbare Flächenelementgröße, darstellt. Die Strahldichte ist im allgemeinen ortsabhängig und richtungsabhängig, d.h.  $L = L(x, y, \theta, \phi)$ .

Die Bestrahlungsstärke  $E$  bzw. die spezifische Ausstrahlung  $M$  hängen mit der Strahldichte  $L$  zusammen. Zunächst betrachten wir eine differentielle Bestrahlungsstärke  $dE$  oder eine differentielle spezifische Ausstrahlung  $dM$  (Gleichung (2.3-2) bzw. (2.3-3)):

$$dE \text{ oder } dM = \frac{d^2\Phi}{dF} \stackrel{(2.3-5)}{=} L(\theta, \phi) \cdot \cos\theta \cdot d\Omega \quad (2.3-6)$$

Diese Beziehung kann man so interpretieren, daß aus dem Halbraum (Bild 2.3-3 a und b) in einer Richtung  $(\theta, \phi)$  ein kleiner Sektor  $d\Omega$  herausgenommen wird. Durch Integration von (2.3-6) über den Halbraum erhält man:

$$E \text{ oder } M = \int_{\text{Halbraum}} L \cdot \cos\theta \cdot d\Omega \quad (2.3-7)$$

Bei Kenntnis der Strahldichte  $L_S = L(x, y, \theta, \phi)$  der Oberfläche eines "Senders" kann man den Strahlungsfluß  $\Phi$  berechnen, der zu einem "Empfänger" fließt. Der Strahlungsfluß  $d^2\Phi$  vom Sender-Flächenelement  $dF_S$  zum Empfänger-Flächenelement  $dF_E$  ist (Bild 2.3-4):

$$(2.3-5): \quad d^2\Phi = L_S \cdot \cos\theta_S \cdot dF_S \cdot d\Omega_S \stackrel{(2.3-1)}{=} L_S \cdot \frac{dF_S \cdot \cos\theta_S \cdot dF_E \cdot \cos\theta_E}{r^2} \quad (2.3-8)$$

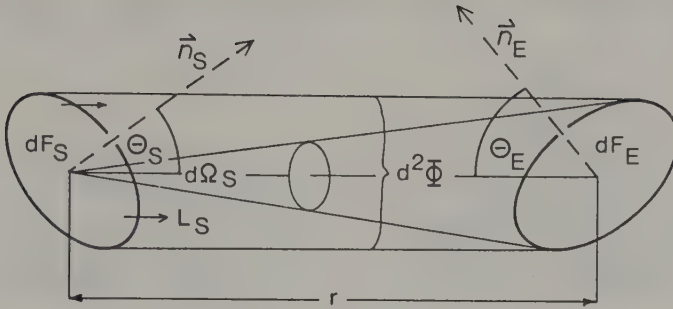


Bild 2.3-4: Strahlungsfluß zwischen Sender ( $\hat{S}$ ) und Empfänger ( $\hat{E}$ )

Durch Integration erhält man:

$$\ddagger = \int_{\text{Sender}} \int_{\text{Oberfl.}} L_S \cdot \cos \theta_S \cdot \cos \theta_E \cdot \frac{1}{r^2} dF_S \cdot dF_E \quad (2.3-9)$$

Die Geländeoberfläche emittiert und reflektiert Strahlung oft mit richtungsunabhängiger Strahldichte  $L$  (diffuse Reflexion, Abschnitt 2.5, Bild 2.5-2): Bei konstantem  $dF$  und konstantem  $d\Omega$  ist dann der differentielle Strahlungsfluß  $d^2\ddagger$  proportional zu  $\cos \theta$  (siehe Bild 2.3-5 links). Setzen wir den zu  $\cos \theta$  proportionalen Strahlungsfluß  $d^2\ddagger$  in (2.3-5) ein, wird die Strahldichte  $L$  unabhängig vom Winkel  $\theta$  (Bild 2.3-5 rechts). Ein Strahler mit dieser Eigenschaft wird Lambertscher Strahler genannt. Für einen Lambertschen Strahler gilt:

$$\left[ M \right] \stackrel{(2.3-7)}{=} L \int \cos \theta \cdot d\Omega = \pi \cdot L \quad (2.3-10)$$

Bei oberflächlicher Betrachtung könnte man erwarten, daß  $M = 2\pi \cdot L$  ist. Berücksichtigt man jedoch die erwähnte  $\cos \theta$ -Abhängigkeit von  $d^2\ddagger$  - wie im Bild 2.3-5 links angedeutet -, so ergibt sich beim Aufsummieren (Integrieren) über den gesamten Halbraum, auf den sich ja  $M$  bezieht, nur der Faktor  $\pi$ . Die exakte Ableitung dieser Beziehung ist im Anhang 2.3-1 gegeben.



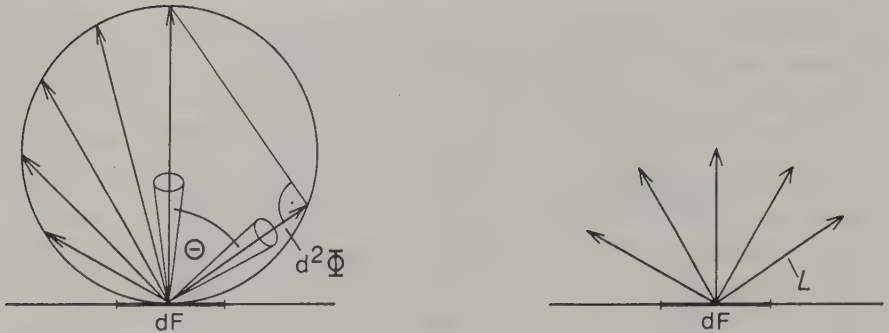


Bild 2.3-5: Lambertscher Strahler

links: Strahlungsfluß  $d^2\Phi$  in Abhängigkeit von  $\theta$   
rechts: (konstante) Strahldichte  $L$

Beispiel: Aufnahme eines photographischen Luftbildes unter Vernachlässigung des Einflusses der Atmosphäre: Eine photographische Kamera nehme aus einem Flugzeug bei senkrechter Aufnahmerichtung das unter dem Flugpfad liegende ebene Gelände (landwirtschaftliches Gebiet) auf. Das Gelände ist von der Sonne bestrahlt. Ein Acker liegt genau unter dem Flugzeug, sodaß er in der Mitte des entstehenden Luftbildes abgebildet wird. Die geometrische und radiometrische Situation ist im Bild 2.3-6 veranschaulicht. Es werden folgende Symbole verwendet:

- $I_S$   $\hat{=}$  Strahlstärke der Sonne.
- $d^*S$   $\hat{=}$  Strahlungsfluß von der Sonne auf ein differentielles, auf die Sonneneinstrahlungsrichtung senkrecht stehendes Flächenelement  $dF_S$ .
- $r_S$   $\hat{=}$  Entfernung Sonne - Erde.
- $d\Omega_S$   $\hat{=}$  Raumwinkel, unter dem  $dF_S$  bzw. das horizontale Gelände flächenelement  $dF_G$  von der Sonne aus gesehen wird.
- $\theta$   $\hat{=}$  Zenitwinkel der Sonne.
- $E_G$   $\hat{=}$  Bestrahlungsstärke der horizontalen Geländeoberfläche
- $M_G$   $\hat{=}$  Spezifische Ausstrahlung der Geländeoberfläche (des Ackers) durch diffuse Reflexion der Sonnenstrahlung.
- $L_G$   $\hat{=}$  Strahldichte der Geländeoberfläche (des Ackers) senkrecht nach oben.
- $d^*L$   $\hat{=}$  Strahlungsfluß, der vom Geländeoberflächenelement  $dF_G$  ausgeht und durch das Kameraobjektiv tritt.
- $E_B$   $\hat{=}$  Bestrahlungsstärke in der Mitte der Bildebene.
- $dF_B$   $\hat{=}$  Flächenelement in der Bildebene (Abbildung des horizontalen Gelände flächenelementes  $dF_G$ ).
- $h$   $\hat{=}$  Flughöhe über Grund (Entfernung Acker - Kamera).
- $f$   $\hat{=}$  Brennweite der Kamera.
- $d_L$   $\hat{=}$  Blendendurchmesser.
- $F_L$   $\hat{=}$  Wirksame Objektivfläche (Blendenöffnung).

$\Omega_L$  = Raumwinkel, unter dem die Blendenöffnung des Objektivs vom Boden aus gesehen wird.

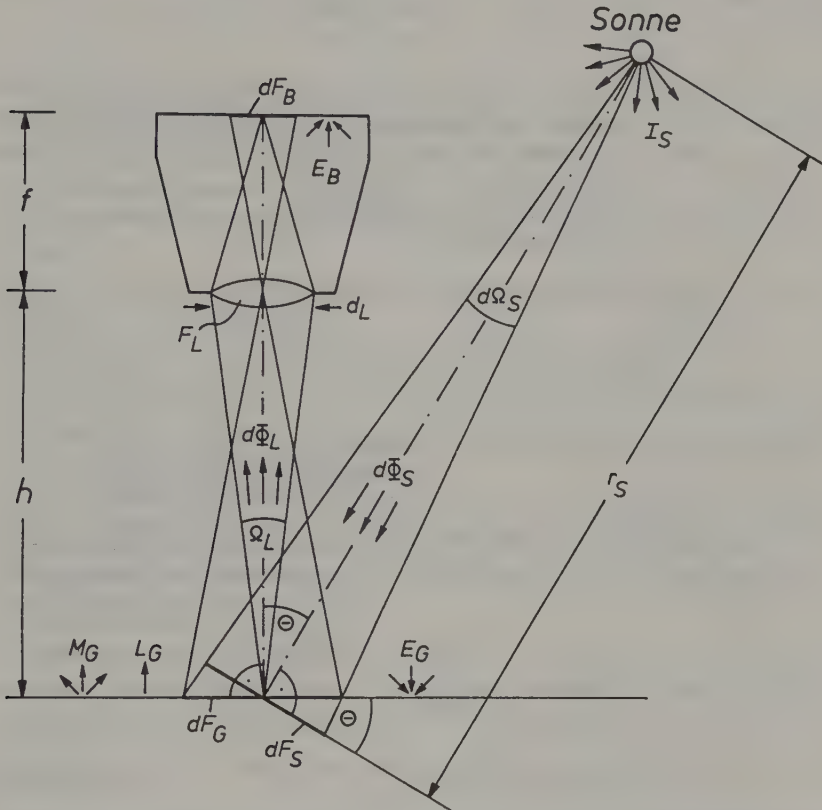


Bild 2.3-6: Aufnahme eines photographischen Bildes

Gegeben:  $I_S = 1.24 \cdot 10^{25} \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$  (im Bereich des sichtbaren Lichtes).  
 $r_S = 149.6 \cdot 10^6 \text{ km}$ ,  $\theta = 30^\circ$ .  
 Diffuses Reflexionsvermögen des Geländes (Ackers)  $\rho = M_G/E_G = 0.1$  (Lambertscher Strahler).  
 $h = 2000 \text{ m}$ ,  $f = 21 \text{ cm}$ .  
 Blendenzahl  $k = f/d_L = 5.6$ , d.h.  $d_L = 21 \text{ cm} / 5.6 = 3.75 \text{ cm}$ .

Gesucht: Bestrahlungsstärke  $E_B$  in der Bildebene bzw. auf die Filmschicht (Bildmitte, Abbild des Ackers).

Lösung:

$$(2.3-1): d\Omega_S = \frac{dF_S}{r_S^2} = \frac{dF_G \cdot \cos\theta}{r_S^2} \Rightarrow dF_G = \frac{d\Omega_S \cdot r_S^2}{\cos\theta} \quad (2.3-11)$$

$$(2.3-2): E_G = \frac{d\dot{\Phi}_S}{dF_G} \quad (\text{Beachte: Für die Berechnung von } E_G \text{ ist der aus dem gesamten Halbraum auf } dF_G \text{ einfallende Strahlungsfluß zu nehmen. Da aber - bei Vernachlässigung des Einflusses der Atmosphäre bzw. der in ihr gestreuten Sonnenstrahlung - nur direkte Sonnenstrahlung auf } dF_G \text{ fällt, stellt } d\dot{\Phi}_S \text{ den gesamten einfallenden Strahlungsfluß dar.})$$

$$E_G = \frac{d\dot{\Phi}_S}{dF_G} \stackrel{(2.3-11)}{=} \frac{d\dot{\Phi}_S \cdot \cos\theta}{d\Omega_S \cdot r_S^2} \stackrel{(2.3-4)}{=} \frac{I_S \cdot \cos\theta}{r_S^2} = 480 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \quad (2.3-12)$$

$$M_G = \rho \cdot E_G = 0.1 \cdot E_G = 48.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$(2.3-10): L_G = \frac{1}{\pi} M_G = 15.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \quad (\text{wegen der vorausgesetzten Lambertischen Charakteristik der reflektierten Strahlung})$$

$$(2.3-5): L_G = \frac{d\dot{\Phi}_L}{dF_G \cdot \Omega_L} \Rightarrow d\dot{\Phi}_L = L_G \cdot \Omega_L \cdot dF_G \quad (\text{Obwohl } \Omega_L \text{ sehr klein ist, wurde nicht die Bezeichnung } d\Omega_L \text{ gewählt; auf diese Weise wird aus dem zweiten Differential } d^2\dot{\Phi} \text{ das erste Differential } d\dot{\Phi}.)$$

$$(2.3-1): \Omega_L = \frac{F_L}{h^2} = \frac{d_L^2 \cdot \pi}{4 \cdot h^2} = 2.76 \cdot 10^{-10} \text{ sr}$$

$$d\dot{\Phi}_L = 15.3 \cdot 2.76 \cdot 10^{-10} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot dF_G$$

$$\frac{dF_B}{dF_G} = \frac{f^2}{h^2} = 1.10 \cdot 10^{-8} \Rightarrow dF_B = 1.10 \cdot 10^{-8} \cdot dF_G$$

Nimmt man an, daß der gesamte auf das Objektiv fallende Strahlungsfluß  $d\dot{\Phi}_L$  die Filmschicht innerhalb der Fläche  $dF_B$  erreicht (d.h., daß die Transmissionsverluste des Objektivs vernachlässigbar sind und daß das Objektiv scharf abbildet), so folgt mit (2.3-2):

$$E_B = \frac{d\dot{\Phi}_L}{dF_B} = \frac{dF_G \cdot 42.2 \cdot 10^{-10}}{dF_G \cdot 1.10 \cdot 10^{-8}} = 0.384 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Wenn man dieses Beispiel nicht mit Zahlen, sondern in allgemeiner Form durchzieht, erhält man folgende Beziehung:

$$E_B = \frac{d_L^2}{4f^2} \cdot \frac{I_S}{r_S^2} \cos\theta \cdot \rho = \frac{d_L^2}{4f^2} \cdot E_G \cdot \rho \quad (2.3-13)$$

Daraus können wir einige wichtige Erkenntnisse für die auf den Film treffende Bestrahlungsstärke  $E_B$  ziehen, wobei die im Bild 2.3-4 skizzierte spezielle Aufnahmeanordnung gilt und die erwähnten Einschränkungen zu beachten sind:

- Die Flughöhe  $h$  hat keinen Einfluß. (Man gebe dafür eine plausible Erklärung !)
- Die Größe des Flächenelementes  $dF_G$  - d.h. die Größe des Ackers - hat ebenfalls keinen Einfluß.
- Der Sonnenstand, d.h. der Winkel  $\theta$ , wirkt sich mit  $\cos\theta$  aus.
- Mit Vergrößerung des Blendendurchmessers  $d_L$  und/oder Verkleinerung der Brennweite  $f$  steigt die Bestrahlungsstärke, und zwar mit dem Quadrat der inversen Blendenzahl  $1/k = d_L/f$ .
- Für eine Aufnahme, die zu einem bestimmten Zeitpunkt gemacht wird, ist die Bestrahlungsstärke  $E_B$  direkt proportional zum Reflexionsgrad  $\rho$ . Das Photo registriert sozusagen die Reflexionsgrade der Geländeoberflächenelemente.

Der Einfluß der Atmosphäre wird im Abschnitt 2.7 diskutiert. Die Berücksichtigung bergigen Geländes und die Abbildung außerhalb der Bildmitte werden im Abschnitt 3.1.1.3 besprochen.

Aufgabe 2.3-1: Man wiederhole das Zahlenbeispiel mit der Flughöhe  $h = 1500$  m.

Aufgabe 2.3-2: Man wiederhole das Zahlenbeispiel mit einem Reflexionsgrad  $\rho = 0.15$  (Lehmboden), einem Sonnenstand  $\theta = 45^\circ$  und einer Blendenzahl  $k = 8$ .

Aufgabe 2.3-3: Die Entfernung Erde - Sonne variiert im Laufe eines Jahres um  $\pm 2.5 \cdot 10^6$  km. Wie wirkt sich dieses Variation auf die Filmbestrahlungsstärke  $E_B$  aus ?

Aufgabe 2.3-4: Man berechne für das Zahlenbeispiel die auf das Objektiv treffende Bestrahlungsstärke unter der Annahme, daß der Acker unendlich groß ist, d.h. sich in allen Richtungen bis zum Horizont erstreckt !.

Die bisher besprochenen radiometrischen Größen beziehen sich jeweils auf ein bestimmtes Wellenlängenintervall, das explizit anzugeben ist. Zur Charakterisierung der Wellenlängenabhängigkeit der Strahlung dienen spektrale radiometrische Größen: Bezieht man eine der bisher definierten Größen auf ein (differentiell) kleines Wellenlängenintervall  $d\lambda$  und dividiert man



durch dieses Intervall  $d\lambda$ , so erhält man die zugehörige spektrale Größe, die durch den Index  $\lambda$  gekennzeichnet wird:<sup>1</sup>

Spektraler Strahlungsfluß:

$$\dot{q}_{\lambda} = \frac{d\dot{q}}{d\lambda} [W \cdot m^{-1}] \text{ oder } [W \cdot \mu m^{-1}] \text{ oder } [W \cdot nm^{-1}] \quad (2.3-14)$$

Spektrale Bestrahlungsstärke:

$$E_{\lambda} = \frac{dE}{d\lambda} \stackrel{(2.3-2)}{=} \frac{d^2\dot{q}}{dF \cdot d\lambda} [W \cdot m^{-3}] \text{ oder } [W \cdot m^{-2} \mu m^{-1}] \text{ usw.} \quad (2.3-15)$$

Spektrale spezifische Ausstrahlung:

$$M_{\lambda} = \frac{dM}{d\lambda} \stackrel{(2.3-3)}{=} \frac{d^2\dot{q}}{dF \cdot d\lambda} [W \cdot m^{-3}] \text{ oder } [W \cdot m^{-2} \mu m^{-1}] \text{ usw.} \quad (2.3-16)$$

Spektrale Strahlstärke:

$$I_{\lambda} = \frac{dI}{d\lambda} \stackrel{(2.3-4)}{=} \frac{d^2\dot{q}}{d\Omega \cdot d\lambda} [W \cdot sr^{-1} m^{-1}] \text{ oder } [W \cdot sr^{-1} \mu m^{-1}] \text{ usw.} \quad (2.3-17)$$

Spektrale Strahldichte:

$$L_{\lambda} = \frac{dL}{d\lambda} \stackrel{(2.3-5)}{=} \frac{d^3\dot{q}}{\cos\theta \cdot dF \cdot d\Omega \cdot d\lambda} [W \cdot m^{-3} sr^{-1}] \text{ oder } [W \cdot m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}] \text{ usw.} \quad (2.3-18)$$

Fortsetzung des Zahlenbeispiels:

$$\begin{aligned} \text{Gegeben: } I_{S, \lambda=0.55 \mu m} &= 4.43 \cdot 10^{25} \text{ W} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1} \\ I_{S, \lambda=0.80 \mu m} &= 2.25 \cdot 10^{25} \text{ W} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1} \end{aligned}$$

$$\rho(\lambda=0.55 \mu m) = \frac{M_{G, \lambda=0.55 \mu m}}{E_{G, \lambda=0.55 \mu m}} = 0.15$$

<sup>1</sup> Betrachten wir eine physikalische Größe A als Funktion einer anderen Größe  $\alpha$ , so schreiben wir  $A(\alpha)$ , wenn die Dimension von A unverändert bleibt, jedoch  $A_{\alpha}$ , wenn sich die Dimension beim Übergang von A zu  $A_{\alpha}$  ändert.

$$\rho(\lambda=0.80\mu\text{m}) = \frac{M_{G,\lambda=0.80\mu\text{m}}}{E_{G,\lambda=0.80\mu\text{m}}} = 0.25$$

Damit ergeben sich die folgenden Werte für die spektrale Bestrahlungsstärke der Filmschicht:

$$E_{B,\lambda=0.55\mu\text{m}} = 2.05 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$$

$$E_{B,\lambda=0.80\mu\text{m}} = 1.74 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$$

Neben dem bis jetzt behandelten radiometrischen Einheitensystem ist zur quantitativen Beschreibung von Strahlung im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums auch das photometrische Einheitensystem in Verwendung. Während das radiometrische Einheitensystem von der physikalisch definierten Strahlungsleistung ausgeht, sodaß jede Strahlungsgröße die Dimension Leistung  $[W]$  enthält, baut das photometrische System auf dem Helligkeitsempfinden des menschlichen Auges auf. Photometrische Größen und Einheiten sollten dementsprechend nur dann verwendet werden, wenn das menschliche Auge als Strahlungsempfänger vorgesehen ist, wie z.B. in der Beleuchtungstechnik und bei Instrumenten zur visuellen Betrachtung. In der Fernerkundung sind photometrische Größen möglichst zu vermeiden. Einerseits haben Fernerkundungssensoren praktisch immer eine andere spektrale Empfindlichkeit als das menschliche Auge; andererseits ist außerhalb des Spektralbereiches des sichtbaren Lichtes die Verwendung photometrischer Größen völlig sinnlos. Da in der Fachliteratur, in Firmenspezifikationen usw. jedoch vielfach noch Angaben in photometrischen Größen und Einheiten zu finden sind, werden diese im Anhang 2.3-2 zusammengestellt.

## 2.4 Ausbreitung und Absorption elektromagnetischer Strahlung in Materie

Bisher haben wir uns nur mit elektromagnetischer Strahlung im freien Raum (Vakuum) beschäftigt. In gasförmiger, flüssiger und fester Materie wird elektromagnetische Strahlung von den Materiebausteinen beeinflusst, wobei es zu einer Änderung von Ausbreitungsgeschwindigkeit und Ausbreitungsrichtung, aber auch zur Vernichtung (Absorption) von Strahlung kommen kann. Diese materialspezifischen Wechselwirkungen ermöglichen es uns letzten Endes, mit Hilfe der Fernerkundung Information über entfernte Objekte zu gewinnen.

Die Materie ist aus Atomen und Molekülen aufgebaut, die elektrisch geladene Teilchen enthalten. Diese Teilchen, vor allem die negativ geladenen Elektronen, werden vom oszillierenden elektrischen Feld einer elektromagnetischen Strahlung in ihrer Bewegung beeinflusst. (Die Kraftwirkung des magnetischen Feldes der Strahlung ist im Vergleich dazu gering und kann vernachlässigt werden.) Die schwingenden Teilchen erzeugen oszillierende Felder, d.h. sie senden Strahlung aus, die sich der ursprünglichen Strahlung überlagert und dadurch deren Geschwindigkeit verändert. Das Verhältnis von Vakuumlichtgeschwindigkeit  $c$  (2.2-1) und Geschwindigkeit  $v$  der Strahlung in einem Stoff heißt Brechungsindex des Stoffes:

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.4-1)$$

Im allgemeinen ist  $v < c$  und  $n > 1$ .

Der Brechungsindex hängt, wie zu erwarten ist, von elektrischen Materialeigenschaften ab, welche durch die relative Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_r$  gegeben sind.  $\epsilon_r$  ist der Faktor, um den ein elektrisches Feld durch die Anwesenheit eines Stoffes verringert wird. Es gilt die "Maxwellsche Beziehung"

$$n = \sqrt{\epsilon_r}, \quad (2.4-2)$$

wobei jedoch zu beachten ist, daß beide Größen von der Frequenz  $\nu$  der elektromagnetischen Strahlung abhängig sind, d.h.  $n(\nu)$  bzw.  $\epsilon_r(\nu)$ . Dies hängt damit zusammen, daß einerseits bei höheren Frequenzen immer weniger geladene Teilchen mit den schnellen Schwingungen "mitkommen", und daß es andererseits materialspezifische Eigenfrequenzen gibt, bei denen Resonanzerscheinungen auftreten: Je mehr man sich diesen Resonanzfrequenzen nähert, desto größer wird die Schwingungsamplitude der Teilchen im Strahlungsfeld, so wie ein Pendel umso heftiger ausschlägt, je genauer man es im Rhythmus

seiner Eigenfrequenz antippt. Die Frequenzabhängigkeit des Brechungsindex nennt man Dispersion.

Strahlung kann beim Durchgang durch Materie auch absorbiert ("verschluckt") werden. Die Strahlungsenergie wird dabei in Wärme umgewandelt. Breitet sich ein Strahlungsfluß  $\dot{\Phi}$  in Materie in x-Richtung aus, so ändert sich der Fluß entlang der Wegstrecke dx um den Betrag

$$d\dot{\Phi} = -\mu \cdot \dot{\Phi}(x) dx \quad (2.4-3)$$

$\mu$  heißt "Absorptionskoeffizient" des Stoffes und hat die Dimension Länge<sup>-1</sup>. Durch Integration erhält man das Lambert-Beer-Gesetz (Anhang 2.4-1):

$$\dot{\Phi}(x) = \dot{\Phi}(0) e^{-\mu \cdot x} \quad (2.4-4)$$

wobei  $\dot{\Phi}(0)$  der Strahlungsfluß  $\dot{\Phi}(x)$  für  $x = 0$  ist.

Die Beziehung (2.4-4) gilt für ein homogenes Medium, in dem der Absorptionskoeffizient  $\mu$  unabhängig von  $x$  ist. Bei inhomogenem Medium, z.B. bei der vertikal zu durchlaufenden Atmosphäre, ist der Absorptionskoeffizient abhängig von  $x$ , d.h.  $\mu(x)$ . Für inhomogenes Medium lautet deshalb das Lambert-Beersche-Gesetz:

$$\dot{\Phi}(x) = \dot{\Phi}(0) e^{-\int_0^x \mu(x) dx} \quad (2.4-5)$$

Im homogenen Medium lautet für eine Weglänge (Tiefe, bei Atmosphäre besser: Höhe)  $x_E = 1/\mu$  die Gleichung (2.4-4):  $\dot{\Phi}(x) = \dot{\Phi}(0) e^{-1}$ , d.h. der Strahlungsfluß  $\dot{\Phi}$  wird um den Faktor  $1/e$  abgeschwächt. Diese Weglänge  $x_E$  nennt man Eindringtiefe.

Der Absorptionskoeffizient  $\mu$  (bzw. die Eindringtiefe  $x_E$ ) sind für das Material charakteristische Größen. Der Absorptionskoeffizient  $\mu$  ist eine komplizierte Funktion der Frequenz  $\nu$  der elektromagnetischen Strahlung, die vom Material absorbiert wird, d.h.  $\mu = \mu(\nu)$ . Eine vollständige Theorie des Phänomens der Absorption ist schwierig. Vereinfachend kann man sagen, daß es linienhafte und kontinuierliche Absorptionsspektren gibt.

Zum Verständnis der linienhaften Absorption wollen wir den Energiegehalt eines Atoms betrachten, in dem negativ geladene Elektronen um den positiven Kern schwirren. Im Gegensatz zu makroskopischen Körpern können diese Teilchen nicht in beliebigen Energiezuständen existieren, sondern nur bestimmte diskrete Energieinhalte annehmen, was graphisch in einem sogenannten

Energieniveauschema (Bild 2.4-1) veranschaulicht wird: Die vertikale Achse eines solchen Diagramms bezeichnet die Energie  $Q$ . Freie, in Ruhe befindliche Elektronen haben die Energie Null. Freie, in Bewegung befindliche Elektronen können, je nach Geschwindigkeit, eine beliebige (positive) Energie annehmen, was durch den schraffierten Bereich im Energieniveauschema angedeutet ist. In einem Atom gebundene Elektronen haben eine negative Energie, da sie vom Atomkern angezogen werden und Arbeit aufgewendet werden muß, um sie wieder aus dem Atom zu lösen. Sie können sich im Atom jedoch nur in ganz bestimmten Energiezuständen aufhalten (diskrete Energieniveaus im Schema).

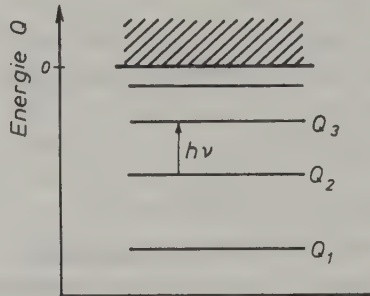


Bild 2.4-1: Energieniveauschema eines Atoms

Diese zunächst befremdlich und ungewohnt erscheinende Tatsache wird leichter verständlich, wenn man den schon oben erwähnten Dualismus Welle-Teilchen berücksichtigt, das Elektron als Wellenphänomen auffaßt und bedenkt, daß Wellen in begrenzten Räumen nur in diskreten Zuständen vorkommen (so wie z.B. in einer Orgelpfeife nur akustische Wellen einer bestimmten Frequenz, d.h. einer bestimmten Tonhöhe, angeregt werden können).

Durchläuft nun elektromagnetische Strahlung (d.h. ein Photonenstrom) Materie, so können die Photonen ihre Energie an Elektronen abgeben und diese auf höhere Energieniveaus heben, wenn die Photonenenergie mit der Differenz zweier Energieniveaus übereinstimmt (2.2-3):

$$Q_m - Q_n = h \cdot \nu \quad (2.4-6)$$

Es kommt in diesem Fall zur Absorption der Strahlung. Jede Atomart absorbiert also nur Strahlung ganz bestimmter Photonenenergien bzw. ganz bestimmter Frequenzen  $\nu$ , wodurch die Entstehung von Linienspektren verständlich wird.

Die Moleküle eines Gases führen Vibrations- und Rotationsbewegungen aus. Die zugehörigen Energieinhalte sind, ebenso wie die Energien der Elektronen im Atom, gequantelt, d.h. es kommen nur diskrete Energieniveaus vor. Die Gesamtenergie eines Moleküls,  $Q_{\text{ges}}$ , setzt sich aus der Energie  $Q_E$  der Elektronen in der Atomhülle, aus der Vibrationsenergie  $Q_V$  der Atome der Moleküle sowie aus der Rotationsenergie  $Q_R$  des Gesamtmoleküls zusammen:

$$Q_{\text{ges}} = Q_E + Q_V + Q_R \quad (2.4-7)$$

Die Abstände der Vibrationsenergieniveaus sind sehr viel kleiner als jene der Elektronenniveaus. Es kommt daher zu einer Aufspaltung der Elektronen-



niveaus durch die Vibrationsniveaus. Die Rotationsniveaus liegen noch sehr viel enger beisammen als die Vibrationsniveaus: Diese werden daher durch die Rotationsniveaus weiter aufgespalten (siehe Bild 2.4-2).

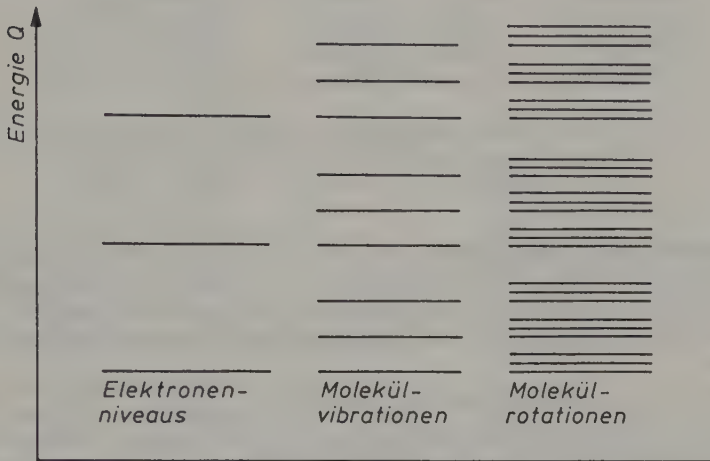


Bild 2.4-2: Energieniveauschema eines Moleküls

Je komplizierter ein Molekül aufgebaut ist, je vielfältiger also Vibrations- und Rotationsmöglichkeiten sind, desto zahlreicher und dichter gepackt sind die Energieniveaus, zwischen denen Übergänge bei gleichzeitiger Absorption von Strahlung möglich sind. Die Absorptionsspektren sind bei Molekülen, im Gegensatz zu den Linienpektren freier Atome, sogenannte Bandenspektren, bei denen durch die sehr große Linienanzahl der Eindruck kontinuierlicher Absorptionsbereiche entstehen kann. Tabelle 2.4-3 deutet die Größenordnung der Energieniveauunterschiede  $\Delta Q$  von Elektronen-, Molekülvibrations- und Molekülrotationsübergängen sowie die zugehörigen Frequenzen  $\nu$  und Spektralbereiche an.

Übergang	$\Delta Q$ [eV]	$\nu = \Delta Q/h$ [Hz]	Spektralbereich
Elektronen	10	$2.4 \cdot 10^{15}$	Ultraviolett und sichtbar
Vibration	$10^{-1}$	$2.4 \cdot 10^{13}$	Infrarot
Rotation	$10^{-3}$	$2.4 \cdot 10^{11}$	Mikrowellen

Tab. 2.4-3: Energieübergänge in Atomen und Molekülen mit zugehörigen Energiedifferenzen, Frequenzen und Spektralbereichen (nach Schanda, 1986)

Bei flüssigen und festen Körpern sind die Verhältnisse noch komplizierter: Die Elektronen in den Atomhüllen werden von den Nachbaratomen beeinflusst, und die Moleküle können nicht vibrieren und rotieren, ohne sich gegenseitig zu behindern. Die Zahl der möglichen Energiezustände wird dadurch weiter drastisch erhöht, sodaß praktisch kontinuierliche Absorptionsspektren gegeben sind.

In gewissen (vor allem organischen) Molekülen gibt es Elektronen, die nicht zu einzelnen Atomen gehören, sondern der Gesamtstruktur der Moleküle zuzuordnen sind. Es ergibt sich eine sehr komplizierte Struktur der Elektronenenergieniveaus, bei der bevorzugt Energieübergänge  $\Delta Q$  im Bereich von etwa 2eV auftreten. Diese Energieübergänge entsprechen Photonenenergien des sichtbaren Lichtes. Je nach Lage der ausgeprägten Absorptionsbereiche im Spektrum erscheinen diese Substanzen in gesättigten Farben: Es handelt sich um Farbstoffe. Der biologisch wichtigste "Farbstoff" dieser Art, mit dem wir uns auch in der Fernerkundung noch näher befassen müssen, ist das Chlorophyll, dessen Absorptionsspektrum im Bild 2.4-4 wiedergegeben ist.

In transparenten Festkörpern mit unregelmäßig verteilten mikroskopischen Teilchen, die absorbieren oder einen vom Übrigen Stoff abweichenden Brechungsindex haben, in transparenten Flüssigkeiten mit entsprechenden Schwebstoffen, sowie generell in Gasen tritt (Volums-) Streuung von Strahlung auf: Ein Teil der Strahlung wird aus seiner ursprünglichen Ausbreitungsrichtung abgelenkt, wobei eine gewisse Richtungsverteilung der gestreuten Strahlung gegeben ist. Vorbedingung für Streuphänomene ist eine unregelmäßige Anordnung der streuenden Teilchen. Daher wird Strahlung in homogenen, reinsten Festkörpern und Flüssigkeiten nicht gestreut, wohl aber in reinsten Gasen, da hier immer statistische Dichteschwankungen der Moleküle vorhanden sind. Wir werden uns bei der Besprechung der Wechselwirkung von elektromagnetischer Strahlung mit der Atmosphäre noch genauer mit Streuprozessen zu befassen haben.

Weiterführende Literatur: Schanda, 1986.

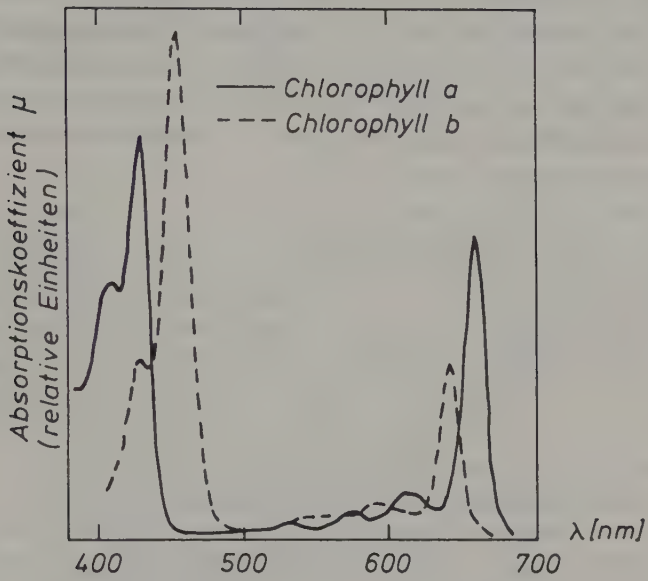


Bild 2.4-4: Absorptionsspektrum von Chlorophyll (nach Schanda, 1986)

## 2.5 Reflexion elektromagnetischer Strahlung an der Geländeoberfläche

Trifft der elektromagnetische Strahlungsfluß  $\Phi_0$  gemäß Bild 2.5-1 auf die Grenzfläche zweier Medien I und II mit unterschiedlichen optischen Eigenschaften auf, so wird ein Teil  $\Phi_r$  in das Medium I zurückgeworfen (reflektiert, zurückgestreut). Von dem in das Medium II eindringenden Strahlungsfluß wird der Teil  $\Phi_a$  absorbiert. Der Teil  $\Phi_t$  durchdringt das Medium II ungestört und verläßt es auf der Rückseite als transmittierter Strahlungsfluß. Die Energiebilanz lautet:

$$\Phi_0 = \Phi_r + \Phi_a + \Phi_t \quad (2.5-1)$$

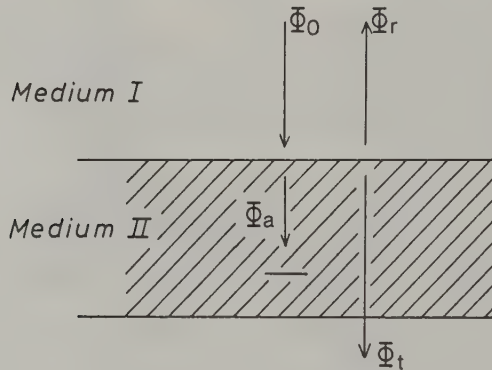


Bild 2.5-1: Strahlungsflußbilanz an der Grenzfläche zweier Medien

Man definiert das Reflexionsvermögen (den Reflexionsgrad)  $\rho$ , das Absorptionsvermögen (den Absorptionsgrad)  $\alpha$  und das Transmissionsvermögen (den Transmissionsgrad)  $\tau$  gemäß

$$\rho = \frac{\Phi_r}{\Phi_0} \quad (\text{Bild 2.3-3}) \quad \frac{M_r}{E}, \quad \alpha = \frac{\Phi_a}{\Phi_0}, \quad \tau = \frac{\Phi_t}{\Phi_0}. \quad (2.5-2)$$

$M_r$  ist die spezifische Ausstrahlung zurück in das Medium I. Nimmt man diese Größen als Funktion der Wellenlänge  $\lambda$  (bzw. der Frequenz  $\nu$ ), so erhält man den spektralen Reflexionsgrad  $\rho(\lambda)$ , den spektralen Absorptionsgrad  $\alpha(\lambda)$  und den spektralen Transmissionsgrad  $\tau(\lambda)$ . Es gilt

$$\rho(\lambda) + \alpha(\lambda) + \tau(\lambda) = 1. \quad (2.5-3)$$

Betrachtet man im Fall der Fernerkundung die Geländeoberfläche, so ist es vielfach nicht nötig, den Anteil  $\Phi_t$  getrennt auszuweisen: Letzten Endes wird  $\Phi_t$  von tieferliegenden Schichten absorbiert oder aber reflektiert und zurückgestreut.  $\Phi_t$  kann daher auf den absorbierten und auf den reflektierten Strahlungsfluß aufgeteilt werden, sodaß sich

$$\rho(\lambda) + \alpha(\lambda) = 1 \quad (2.5-4)$$

ergibt.

Das für eine Oberfläche definierte Absorptionsvermögen  $\alpha$  (Gleichung (2.5-2)) darf nicht mit dem Absorptionskoeffizienten  $\mu$  eines Stoffes (Gleichung (2.4-3)) verwechselt werden.  $\alpha$  ist eine dimensionslose Größe,  $\mu$  hat die Dimension  $[Länge^{-1}]$ .  $\alpha$  hängt von Material, Oberflächenbeschaffenheit und Dicke eines Körpers ab,  $\mu$  nur vom Material. Beide Größen sind weitgehend unabhängig voneinander: So weisen z.B. Metalle, insbesondere wenn sie eine polierte Oberfläche haben, im Bereich sichtbaren Lichts ein hohes Reflexionsvermögen und damit ein geringes Absorptionsvermögen auf. Der Absorptionskoeffizient von Metallen ist demgegenüber sehr groß - Metalle lassen schon in dünnen Schichten praktisch kein Licht durch.

Die Reflexion kann an der Grenzfläche zwischen zwei in sich homogenen Medien auftreten (Oberflächenreflexion) oder aber durch Rückstreuung an unregelmäßig verteilten Einschlüssen und Diskontinuitäten im Medium II (Volumsreflexion) hervorgerufen werden. Je nach der Richtungsverteilung der reflektierten Strahlung unterscheidet man zwischen gerichteter Reflexion und diffuser Reflexion (Bild 2.5-2).

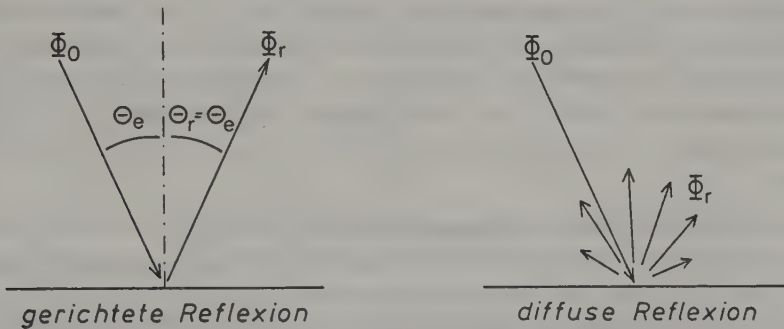


Bild 2.5-2: Gerichtete Reflexion und diffuse Reflexion

Volumsreflexion ist immer diffus. Reflexion an glatten Oberflächen ist gerichtet; Reflexion an rauen Oberflächen ist diffus. Das "Rayleigh-Kriterium" erlaubt eine quantitative Charakterisierung der Rauigkeit: Eine Ober-



fläche ist für Strahlung der Wellenlänge  $\lambda$  glatt, die unter dem Winkel  $\theta$  zwischen Flächennormaler und Strahlrichtung einfällt, wenn

$$h < \frac{\lambda}{8 \cos \theta} \quad (2.5-5)$$

wobei  $h$  die Standardabweichung der Oberflächenunebenheiten ist (Bild 2.5-3). Rauigkeit ist also ein relativer Begriff und hängt von der Wellenlänge der Strahlung ab: Für sichtbares Licht kann von allen natürlich vorkommenden Geländeoberflächen nur eine ruhige Wasseroberfläche als glatt bezeichnet werden. Die Geländeoberfläche reflektiert also diffus. Für Mikrowellen ist auch eine Sand- und Schotterfläche glatt und reflektiert die Strahlung wie ein Spiegel.



Bild 2.5-3: Zur Definition der Oberflächenrauigkeit

Intensität und Spektralverteilung von gerichtet reflektierter Strahlung hängen von Materialeigenschaften (Brechungsindex) ab. Die unter einem ganz bestimmten Winkel gerichtet reflektierte Strahlung ist für Fernerkundungs-aufnahmen aber nur in Ausnahmefällen wirksam, da sie im allgemeinen nicht vom Sensor erfaßt wird. Die glatten Flächen erscheinen auf den Fernerkundungsbildern in "Dunkel" bis "Schwarz" (z.B. ruhige Wasseroberfläche auf photographischen Bildern, wenn nicht Schwebstoffe im Wasser eine diffuse Volumesreflexion verursachen; vegetationsloser glatter Boden auf Radarbildern).

Die für die Fernerkundung bedeutendere diffuse Reflexion ist von den Materialeigenschaften, der Oberflächenstruktur und (da bei teilweiser Transparenz der Stoffe oft auch Volumesrückstreuung stattfindet) der inneren Struktur der reflektierenden Objekte bestimmt. Meist ist eine ausgeprägte Richtungsabhängigkeit der Reflexion gegeben, was einerseits für die Auswertung von Fernerkundungsbilddaten stören, andererseits aber auch durch gezielte Aufnahme- und Auswertemethoden bewußt ausgenutzt werden kann.

Eine Richtungsabhängigkeit der diffus reflektierten Strahlung ist vielfach schon dadurch bedingt, daß sich die einzelnen reflektierenden Elemente für

verschiedene Reflexionsrichtungen in unterschiedlichem Maße gegenseitig abdecken.

Beispiel: Wir betrachten gemäß Bild 2.5-4 die von einem idealisierten Pflanzenbestand (z.B. einer Rebekultur) in verschiedene Richtungen reflektierte Strahlung. Es werde angenommen, daß der Boden frisch bearbeitet, d.h. ohne Grasbewuchs ist. Für die Reflexion von Strahlung in Richtung 1 sind das besonnte Laub der Pflanzenreihen zu 20% Flächenanteil, besonnener Boden zu 40% und beschatteter Boden zu ebenfalls 40% wirksam. In Richtung 2 strahlen (mit einem Flächenanteil von 60%) besonnte Laubreihen sowie (mit

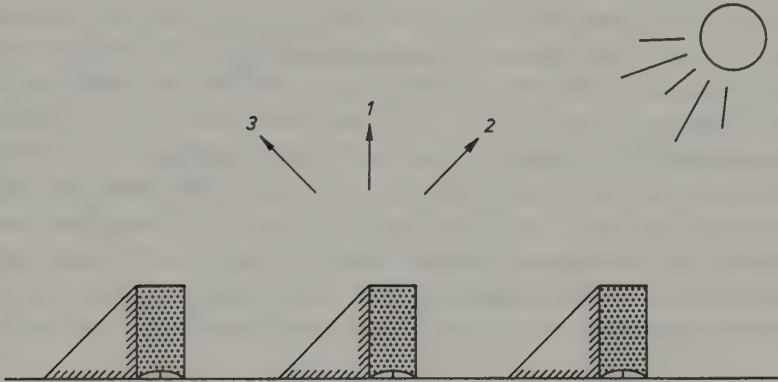


Bild 2.5-4: Beispiel zur Richtungsverteilung der reflektierten Strahlung

einem Flächenanteil von 40%) besonnener Boden. In Richtung 3 reflektieren besonntes Laub (20%), beschattetes Laub (40%) und beschatteter Boden (40%). Die (richtungsunabhängige) Strahldichte der reflektierten Strahlung im Spektralbereich sichtbaren Lichtes sei bei Sonnenbestrahlung für Laub  $L_L = 3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$  und für Boden  $L_B = 11 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ . Die entsprechenden Werte für Schattenbereiche seien um einen Faktor 6 niedriger. Man erhält für die Strahldichte der reflektierten Strahlung:

$$\text{in Richtung 1: } L_1 = 0.2 \cdot L_L + 0.4 \cdot L_B + 0.4 \cdot \frac{1}{6} L_B = 5.73 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$$

$$\text{in Richtung 2: } L_2 = 0.6 \cdot L_L + 0.4 \cdot L_B = 6.20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$$

$$\text{in Richtung 3: } L_3 = 0.2 \cdot L_L + 0.4 \cdot \frac{1}{6} L_L + 0.4 \cdot \frac{1}{6} L_B = 1.53 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$$

Diese Strahldichtewerte sind natürlich nur dann in dieser über die einzelnen Flächenanteile gemittelten Form sinnvoll, wenn der Pflanzenbestand mit einem die einzelnen Reihen räumlich nicht auflösenden Sensor erfaßt wird, etwa von Satelliten aus.

Aufgabe 2.5-1: Man wiederhole das Zahlenbeispiel für einen Sonneneinfall, der parallel zu den Pflanzenreihen ist. In diesem Fall ist der Boden zur Gänze besonnt und die Seitenflächen der Pflanzenreihen liegen im Schatten. Die Strahldichtewerte für Laub und Boden in Sonne und Schatten werden wie oben angenommen. Die Flächenanteile in Richtung 1 sind für besonntes Laub

20% und für besonnten Boden 80%. Bei Blickrichtung 2 und bei Blickrichtung 3 werden jeweils 20% besonntes Laub, 40% beschattetes Laub und 40% besonnter Boden gesehen.

Man erkennt, daß die Reflexion nicht nur von der Richtung der reflektierten Strahlung, sondern auch von der Richtungsverteilung der einfallenden Strahlung, d.h. von der Art der Beleuchtung, abhängt. Der in der Gleichung (2.5-2) definierte Reflexionsgrad  $\rho = M_r/E$  kann demgemäß die diffuse Reflexion sicher nicht vollständig beschreiben !

Eine erschöpfende Charakterisierung der Reflexionseigenschaften einer Oberfläche ist durch die sogenannte Reflexionsfunktion (bidirectional reflectance distribution function) gegeben. Diese erlaubt die Ermittlung der Strahldichtevertellung  $L_r(\theta_r, \phi_r)$  der reflektierten Strahlung bei gegebener Strahldichtevertellung  $L_e(\theta_e, \phi_e)$  der einfallenden Strahlung. Wir betrachten jenen Anteil der einfallenden Strahlung, der aus einem Raumwinkel  $d\Omega_e$  um die Einfallsrichtung  $(\theta_e, \phi_e)$  kommt und der einen (differentiellen) Anteil  $dE_e(\theta_e, \phi_e)$  der Bestrahlungsstärke der Oberfläche hervorruft. Dieser Anteil der einfallenden Strahlung verursacht den Anteil  $dL_r(\theta_e, \phi_e; \theta_r, \phi_r)$  der reflektierten Strahldichte  $L_r(\theta_r, \phi_r)$ . Die Reflexionsfunktion ist definiert als:

$$f(\theta_e, \phi_e; \theta_r, \phi_r) = \frac{dL_r(\theta_e, \phi_e; \theta_r, \phi_r)}{dE_e(\theta_e, \phi_e)} \stackrel{(2.3-6)}{=} \frac{dL_r(\theta_e, \phi_e; \theta_r, \phi_r)}{L_e(\theta_e, \phi_e) \cdot \cos \theta_e \cdot d\Omega_e} [\text{sr}^{-1}] \quad (2.5-6)$$

Die Dimension der Reflexionsfunktion ist Steradian<sup>-1</sup>.

Es mag zunächst unverständlich erscheinen, daß die Reflexionsfunktion gemäß (2.5-6) definiert ist und nicht als Verhältnis gleichartiger Größen, wodurch sich ein dimensionsloses Verhältnis (wie etwa für den Reflexionsgrad) ergäbe. Der tiefere Grund dafür ist darin zu sehen, daß bei diffuser Reflexion (nicht aber bei gerichteter Reflexion an einem "Spiegel" !) die aus einem beliebig kleinen Raumwinkel  $d\Omega_e$  um eine gegebene Richtung  $(\theta_e, \phi_e)$  einfallende Strahlung in alle Richtungen des Halbraumes reflektiert wird. Bei infinitesimal kleinem Raumwinkel  $d\Omega_e$  wird damit auch die Strahldichte der reflektierten Strahlung für beliebige Richtungen  $(\theta_r, \phi_r)$  infinitesimal klein. Es wäre daher nicht sinnvoll, die differentielle Größe  $dL_r$  durch die endliche Größe  $L_e$  zu dividieren ! Demgegenüber strebt das Verhältnis gemäß Gleichung (2.5-6) bei Verkleinerung des Winkels  $d\Omega_e$  einem konstanten, normalerweise endlichen Wert zu.

Während der gemäß (2.5-2) definierte Reflexionsgrad immer kleiner als 1 ist, kann die Reflexionsfunktion beliebige positive Werte annehmen. Für einen idealen Spiegel wird  $f(\theta_e, \phi_e; \theta_r, \phi_r)$  für Reflexionsrichtungen  $\theta_r \neq \theta_e$  oder  $\phi_e \neq \phi_r + \pi$  gleich Null ( $dL_r(\theta_e, \phi_e; \theta_r, \phi_r)$  wird nämlich gleich Null) und für  $\theta_e = \theta_r$ ,  $\phi_e = \phi_r + \pi$  gleich Unendlich ( $dL_r(\theta_e, \phi_e; \theta_r, \phi_r)$  wird endlich groß, nämlich gleich  $L_e(\theta_e, \phi_e)$ , und  $d\Omega_e$  ist infinitesimal klein).

Die Reflexionsfunktion für beliebige Oberflächen kann im Prinzip mit der in Bild 2.5-5 skizzierten Meßanordnung ermittelt werden. Man beachte jedoch, daß die Reflexionsfunktion von vier unabhängigen Parametern abhängt, sodaß oft einige hundert Meßwerte kaum ausreichen, um diese Funktion mit Richtungsschrittweiten zu erfassen, die eine sinnvolle Interpolation für beliebige Einstrahlungs- und Reflexionsrichtungen erlauben. Ist man auch an der spektralen Abhängigkeit interessiert, so kommt ein fünfter unabhängiger Parameter dazu !

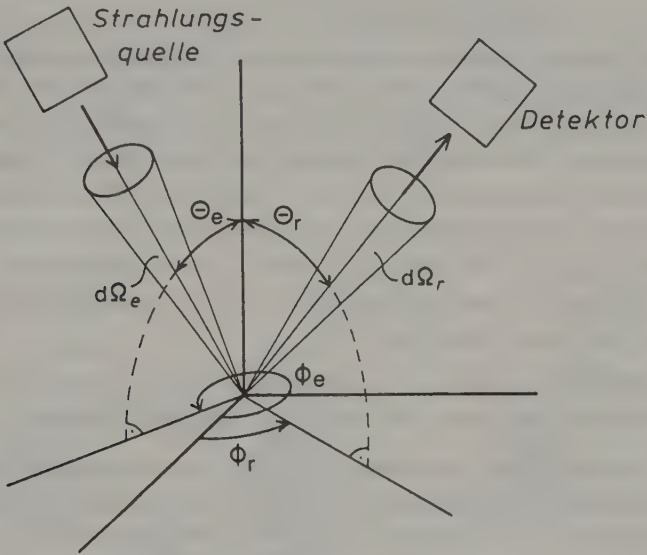


Bild 2.5-5: Messung der Reflexionsfunktion

Kennt man die Reflexionsfunktion, so bekommt man die gesamte Strahldichte  $L_r(\theta_r, \phi_r)$  der reflektierten Strahlung in Richtung  $\theta_r, \phi_r$  durch Integration von (2.5-6) über den Halbraum aller Einfallsrichtungen  $(\theta_e, \phi_e)$ :

$$L_r(\theta_r, \phi_r) = \int_{\text{Halbraum}(\theta_e, \phi_e)} dL_r(\theta_e, \phi_e; \theta_r, \phi_r) = \int_{\text{Halbraum}} f(\theta_e, \phi_e; \theta_r, \phi_r) \cdot L_e(\theta_e, \phi_e) \cdot \cos \theta_e \cdot d\Omega_e \quad (2.5-7)$$

Die Strahldichte  $L_r(\theta_r, \phi_r)$  der reflektierten Strahlung in der Richtung  $\theta_r, \phi_r$  kann man also nur dann ermitteln, wenn man - wie schon gesagt - die Verteilung der Strahldichte  $L_e(\theta_e, \phi_e)$  in Abhängigkeit von der Richtung

$\theta_e, \phi_e$  und die Reflexionsfunktion  $f(\theta_e, \phi_e; \theta_r, \phi_r)$  kennt.

Eine einfachere Reflexionsgröße, die im allgemeinen von der Richtungsverteilung der Einstrahlung  $L_e(\theta_e, \phi_e)$  abhängig ist, ist der gerichtete Reflexionsgrad:

$$\rho_r(\theta_r, \phi_r) = \frac{\pi \cdot L_r(\theta_r, \phi_r)}{E_e} \quad (2.3-7) \quad = \frac{\pi \cdot L_r(\theta_r, \phi_r)}{\int_{\text{Halbraum}} L_e(\theta_e, \phi_e) \cdot \cos \theta_e \cdot d\Omega_e} \quad (2.5-8)$$

Er gibt die Strahldichteverteilung  $L_r(\theta_r, \phi_r)$  der reflektierten Strahlung für eine Bestrahlung aus dem Halbraum mit der Bestrahlungsstärke  $E_e = 1$  an. Da die gleiche Bestrahlungsstärke  $E_e$  durch verschiedene Verteilungen der Strahldichte  $L_e(\theta_e, \phi_e)$  in Abhängigkeit von  $\theta_e, \phi_e$  gegeben sein kann, wodurch bei anisotropen Reflexionseigenschaften auch verschiedene Verteilungen der reflektierten Strahldichte  $L_r(\theta_r, \phi_r)$  verursacht werden, charakterisiert  $\rho_r(\theta_r, \phi_r)$  das Reflexionsverhalten einer Oberfläche nicht eindeutig. Die Angabe von  $\rho_r(\theta_r, \phi_r)$  ist daher nur sinnvoll, wenn gleichzeitig die Richtungsverteilung der Einstrahlung gegeben wird (z.B. natürliche Bestrahlung bei einem bestimmten Sonnenstand).

Der Zusammenhang zwischen Reflexionsfunktion und gerichtetem Reflexionsgrad kann durch Einsetzen von (2.5-7) in (2.5-8) hergestellt werden.

Bei der meßtechnischen Bestimmung des gerichteten Reflexionsgrades  $\rho_r$  ist das untersuchte Flächenelement der (natürlichen) Bestrahlung aus dem Halbraum ausgesetzt. Die Strahldichte  $L_r$  wird mit einem Radiometer mit kleinem Öffnungswinkel in Abhängigkeit von der Richtung  $\theta_r, \phi_r$  gemessen.

Aus dem gerichteten Reflexionsgrad erhält man durch Integration über den gesamten Halbraum den Reflexionsgrad, wie er schon in (2.5-2) definiert wurde:

$$\rho = \frac{\bar{L}_r}{\bar{L}_e} = \frac{M_r}{E_e} \quad (2.3-7) \quad = \frac{1}{E_e} \int_{\text{Halbraum}} L_r(\theta_r, \phi_r) \cdot \cos \theta_r \cdot d\Omega_r \quad =$$

$$= \frac{1}{\pi} \int_{\text{Halbraum}} \rho_r(\theta_r, \phi_r) \cdot \cos \theta_r \cdot d\Omega_r \quad (2.5-9)$$



Der Reflexionsgrad  $\rho$  wird auch Albedo der Oberfläche genannt.

Der Faktor  $\pi$  in der Definitionsgleichung (2.5-8) bewirkt, daß für eine Lambert'sche Oberfläche der gerichtete Reflexionsgrad in die Albedo übergeht, d.h.  $\rho_r(\theta_r, \phi_r) = \rho$  (in diesem Fall ist  $M$  aus Gleichung (2.3-10) in (2.5-8) einzusetzen).

Beispiel: Gesucht ist die Reflexionsfunktion des schon im obigen Beispiel angenommenen idealisierten Pflanzenbestandes (Bilder 2.5-4 und 2.5-6). Die Oberflächen der Pflanzenreihen und die Bodenoberfläche seien diffuse Reflektoren mit richtungsunabhängiger Strahldichte der reflektierten Strahlung. Der Reflexionsgrad der Pflanzenreihen-Oberfläche sei (im sichtbaren Licht)  $\rho_L = 5\%$ , der Reflexionsgrad der Bodenoberfläche sei  $\rho_B = 15\%$ . Mehrfachreflexionen (z.B. von den vertikalen Lauboberflächen reflektierte Strahlung, die auf den Boden und die gegenüberliegende vertikale Lauboberfläche fällt und dort nochmals reflektiert wird) werden vernachlässigt. Man berechne den Wert der Reflexionsfunktion für  $\phi_e = 0$ ,  $\phi_r = 0$  (Einfallsrichtung und Reflexionsrichtung in einer Ebene senkrecht zu den Pflanzenreihen, d.h. in der Zeichenebene von Bild 2.5-6),  $\theta_e = 45^\circ$  und  $\theta_r = 30^\circ$ .

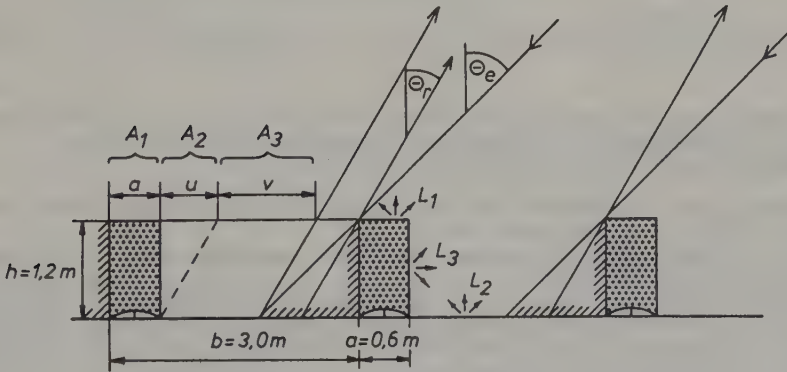


Bild 2.5-6: Beispiel zur Reflexionsfunktion eines idealisierten Pflanzenbestandes

Lösung: Die reflektierte Strahlung setzt sich aus drei Anteilen zusammen:

- Horizontale Lauboberflächen (Flächenanteil  $A_1 = a/b = 0.2$ ) reflektieren mit einer Strahldichte  $dL_1$ .
- Vertikale Lauboberflächen (horizontaler Flächenanteil  $A_2 = u/b = (h \cdot \tan \theta_r)/b = 0.231$ ) reflektieren mit einer Strahldichte  $dL_2$ .
- Horizontale Bodenoberflächen (Flächenanteil  $A_3 = v/b = (b - a - h \cdot \tan \theta_e)/b = 0.4$ ) reflektieren mit einer Strahldichte  $dL_3$ .

Bezeichnet man die Bestrahlungsstärke einer horizontalen Fläche aus der Richtung  $\theta_e$  mit

$$dE_h \stackrel{(2.3-6)}{=} L_e \cdot \cos \theta_e \cdot d\Omega_e, \quad (2.5-10)$$

so gilt für die Strahldichte der Lambertschen Reflektoren:

$$dL_1 \stackrel{(2.3-10)}{=} \frac{1}{\pi} dM_1 \stackrel{(2.5-2)}{=} \frac{1}{\pi} \rho_L \cdot dE_h$$

$$dL_3 = \frac{1}{\pi} dM_3 = \frac{1}{\pi} \rho_B \cdot dE_h.$$

Bei der Ermittlung von  $dL_2$  ist von der Bestrahlungsstärke  $dE_v$  einer vertikalen Fläche auszugehen:

$$dE_v \stackrel{(2.3-6)}{=} L_e \cdot \cos(90^\circ - \theta_e) \cdot d\Omega_e \stackrel{(2.5-10)}{=} \frac{\cos(90^\circ - \theta_e)}{\cos \theta_e} dE_h = \tan \theta_e \cdot dE_h \quad (2.5-11)$$

Es folgt:

$$dL_2 \stackrel{(2.3-10)}{=} \frac{1}{\pi} dM_2 \stackrel{(2.5-2)}{=} \frac{1}{\pi} \rho_L \cdot dE_v \stackrel{(2.5-11)}{=} \frac{1}{\pi} \rho_L \cdot \tan \theta_e \cdot dE_h.$$

Somit liefert die Definitionsgleichung (2.5-6):

$$f(\theta_e=45^\circ, \phi_e=0^\circ; \theta_r=30^\circ, \phi_r=0^\circ) = \frac{A_1 \cdot dL_1 + A_2 \cdot dL_2 + A_3 \cdot dL_3}{dE_h} =$$

$$= \frac{1}{\pi} (A_1 \cdot \rho_L + A_2 \cdot \rho_L \cdot \tan \theta_e + A_3 \cdot \rho_B) = \frac{1}{\pi} (0.2 \cdot 0.05 + 0.231 \cdot 0.05 \cdot 1 + 0.4 \cdot 0.15) = 0.026 \text{ sr}^{-1}$$

Aufgabe 2.5-2: Man berechne die Reflexionsfunktion für den im obigen Beispiel beschriebenen Pflanzenbestand für  $\theta_e=45^\circ, \phi_e=0^\circ, \theta_r=0^\circ, \phi_r=0^\circ$ .

Lösung:  $f(\theta_e=45^\circ, \phi_e=0^\circ; \theta_r=0^\circ, \phi_r=0^\circ) = 0.0223 \text{ sr}^{-1}$ .

Aufgabe 2.5-3: Man berechne die Reflexionsfunktion für den im obigen Beispiel beschriebenen Pflanzenbestand

a) für die Wellenlänge  $\lambda = 0.55 \mu\text{m}$  und b) für die Wellenlänge  $\lambda = 0.80 \mu\text{m}$  jeweils für die Richtungen

$\alpha) \theta_e=45^\circ, \phi_e=0^\circ; \theta_r=30^\circ, \phi_r=0^\circ$  und  $\beta) \theta_e=45^\circ, \phi_e=0^\circ; \theta_r=0^\circ, \phi_r=0^\circ$ .

Der Reflexionsgrad der Lauboberflächen sei  $\rho_L(\lambda=0.55 \mu\text{m}) = 7\%$  bzw.  $\rho_L(\lambda=0.80 \mu\text{m}) = 50\%$ , der Reflexionsgrad des Bodens sei  $\rho_B(\lambda=0.55 \mu\text{m}) = 15\%$  bzw.  $\rho_B(\lambda=0.80 \mu\text{m}) = 23\%$ .

Lösung:  $f(\theta_e=45^\circ, \phi_e=0^\circ; \theta_r=30^\circ, \phi_r=0^\circ; \lambda=0.55 \mu\text{m}) = 0.0287 \text{ sr}^{-1}$

$f(\theta_e=45^\circ, \phi_e=0^\circ; \theta_r=0^\circ, \phi_r=0^\circ; \lambda=0.55 \mu\text{m}) = 0.0236 \text{ sr}^{-1}$

$f(\theta_e=45^\circ, \phi_e=0^\circ; \theta_r=30^\circ, \phi_r=0^\circ; \lambda=0.80 \mu\text{m}) = 0.0979 \text{ sr}^{-1}$

$f(\theta_e=45^\circ, \phi_e=0^\circ; \theta_r=0^\circ, \phi_r=0^\circ; \lambda=0.80 \mu\text{m}) = 0.0611 \text{ sr}^{-1}$

Ergänzung des Beispiels: In analoger Weise kann die Reflexionsfunktion des idealisierten Pflanzenbestandes für beliebige Richtungen  $\theta_e, \phi_e; \theta_r, \phi_r$  ermittelt werden. Die dazu notwendigen Berechnungen sind langwierig, benötigen aber keine über das bisher Erarbeitete hinausgehenden Überlegungen. Wir diskutieren daher das Ergebnis:

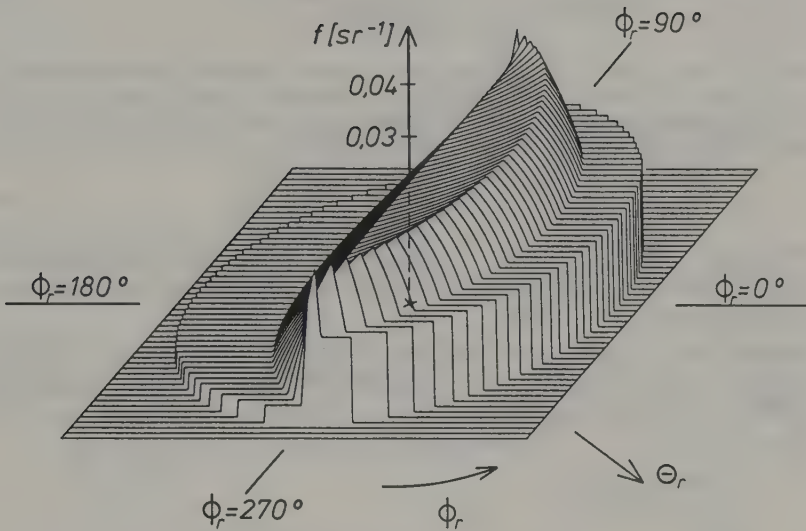


Bild 2.5-7: Reflexionsfunktion des im Bild 2.5-6 skizzierten idealisierten Pflanzenbestandes für die Einstrahlungsrichtung  $\theta_e = 45^\circ$ ,  $\phi_e = 0^\circ$

In Bild 2.5-7 ist die Abhängigkeit der Reflexionsfunktion  $f(\theta_e, \phi_e; \theta_r, \phi_r)$  von  $\theta_r, \phi_r$  bei konstantem  $\theta_e = 45^\circ$  und  $\phi_e = 0^\circ$  dargestellt. Für  $\phi_r = 0^\circ$  (reflektierte Strahlrichtung in der Ebene der einfallenden Strahlrichtung, senkrecht auf die Pflanzenreihen; Mitlichtbereich) liegt das Maximum der Reflexionsfunktion bei  $\theta_r = 45^\circ$ , d.h. bei  $\theta_r = \theta_e$ : Dieses Ergebnis ist plausibel, da für  $\phi_e = \phi_r, \theta_e = \theta_r$  keine Schattenbereiche, aber alle von der Einstrahlung erfaßten Oberflächenteile zur reflektierten Strahldichte beitragen. Man vergleiche diese Eigenschaft der Reflexionsfunktion mit der noch zu besprechenden Erscheinung des Lichtpunktes (hot spot)! Für  $\phi_r = 180^\circ$  (reflektierte Strahlrichtung in der Ebene der einfallenden Strahlrichtung und senkrecht auf die Pflanzenreihen; Gegenlichtbereich) ist die Reflexionsfunktion generell kleiner als für die gleichen Werte von  $\theta_r$  im Mitlichtbereich, da im Gegenlicht Schattenbereiche dominieren, die nichts zur reflektierten Strahldichte beitragen. Für  $\phi_r = 90^\circ$  und  $\phi_r = 270^\circ$  (reflektierte Strahlrichtung in der zu den Pflanzenreihen parallelen Ebene) besteht keine Abhängigkeit der Reflexionsfunktion von  $\theta_r$ , da konstante Anteile von Lauboberflächen und Bodenoberflächen zur reflektierten Strahldichte beitragen und Lambertsche Oberflächen angenommen wurden.

Wir versuchen nun, den gerichteten Reflexionsgrad des Pflanzenbestandes für zwei einfache Einstrahlungsverhältnisse zu ermitteln:

- a) Bestrahlung aus einer Richtung  $\theta_e, \phi_e$  (z.B. Bestrahlung durch die Sonne bei Vernachlässigung des Einflusses der Atmosphäre bzw. der in ihr gestreuten Sonnenstrahlung): Durch Kombination der Gleichungen (2.5-7) und

(2.5-8) erhält man:

$$\rho_r(\theta_r, \phi_r) = \frac{\pi \int f(\theta_e, \phi_e; \theta_r, \phi_r) \cdot L_e(\theta_e, \phi_e) \cdot \cos \theta_e \cdot d\Omega_e}{\int L_e(\theta_e, \phi_e) \cdot \cos \theta_e \cdot d\Omega_e} \quad (2.5-12)$$

Beachtet man, daß  $L_e(\theta_e, \phi_e)$  nur für ein sehr kleines Richtungsintervall um eine konstante Richtung  $\theta_e, \phi_e$  ungleich Null ist, so kann  $f(\theta_e, \phi_e; \theta_r, \phi_r)$  innerhalb dieses kleinen Richtungsintervalls als unabhängig von  $\theta_e, \phi_e$  angenommen und daher vor das Integral im Zähler von (2.5-12) gesetzt werden. Es folgt:

$$\rho_r(\theta_r, \phi_r) = \pi \cdot f(\theta_e, \phi_e; \theta_r, \phi_r). \quad (2.5-13)$$

Bild 2.5-7 stellt also - bei um den Faktor  $\pi$  geänderter Skalierung der vertikalen Koordinatenachse - gleichzeitig den gerichteten Reflexionsgrad des Pflanzenbestandes bei annähernd paralleler Bestrahlung aus der Richtung  $\theta_e=45^\circ, \phi_e=0^\circ$  dar!

- b) Bestrahlung mit einer richtungsunabhängigen Strahldichte  $L_e$  (näherungsweise realisiert durch die Einstrahlungsverhältnisse bei bedecktem Himmel): In (2.5-12) kann nun  $L_e$  sowohl im Zähler als auch im Nenner vor das Integralzeichen gesetzt werden. Unter Beachtung der Beziehung (siehe Anhang 2.3-1)

$$\int \cos \theta_e \cdot d\Omega_e = \pi$$

Halb-  
raum

folgt:

$$\rho_r(\theta_r, \phi_r) = \int_{\substack{\text{Halbraum} \\ \theta_e, \phi_e}} f(\theta_e, \phi_e; \theta_r, \phi_r) \cdot \cos \theta_e \cdot d\Omega_e \quad (2.5-14)$$

Bild 2.5-8 veranschaulicht diese durch numerische Integration ermittelte Richtungsabhängigkeit des gerichteten Reflexionsgrades des idealisierten Pflanzenbestandes. Der gerichtete Reflexionsgrad  $\rho_r$  ist am größten für die Richtungen  $\phi_r = 90^\circ$  und  $\phi_r = 270^\circ$  (bei beliebigem Zenitwinkel  $\theta_r$ ), da in diesem Fall der gesamte, stark reflektierende vegetationslose Boden "gesehen" wird und zu  $\rho_r$  beiträgt. Für alle Richtungen  $\phi_r \neq 90^\circ$  und  $\phi_r \neq 270^\circ$  trägt mit ansteigendem Zenitwinkel  $\theta_r$  zunächst ein immer kleinerer Anteil des vegetationslosen Bodens zu  $\rho_r$  bei.  $\rho_r$  nimmt deshalb bis zu jenem  $\theta_r$  ab, bei dem nur mehr Pflanzenreihen "gesehen" werden. Bei noch flacherer Reflexionsrichtung (größerem  $\theta_r$ ) nimmt  $\rho_r$  wieder etwas zu, da nun nur die oberen, besser ausgeleuchteten Teile der Pflanzenreihen erfaßt werden.

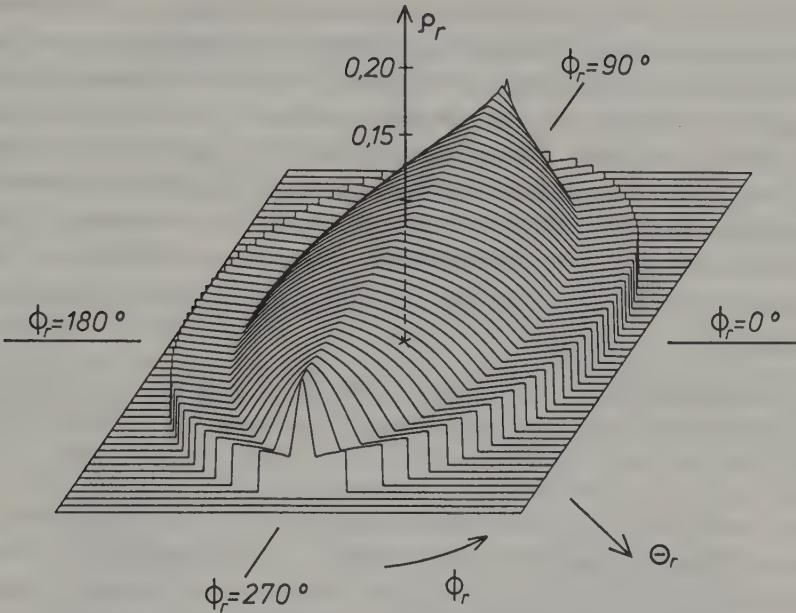


Bild 2.5-8: Gerichteter Reflexionsgrad des in Bild 2.5-6 skizzierten idealisierten Pflanzenbestandes für richtungsunabhängige (diffuse) Einstrahlung

Abschließend seien nochmals die dem vorliegenden Beispiel zugrundeliegenden Voraussetzungen und vereinfachenden Modellvorstellungen zusammengefaßt:

- Die Beschreibung der Reflexionseigenschaften einer aus verschiedenartigen Elementen (Flächenanteilen) zusammengesetzten Oberfläche durch eine einzige - über alle Elemente mittelnde - Reflexionsfunktion ist dann anzuwenden, wenn der Fernerkundungssensor die einzelnen Elemente nicht (mehr) räumlich auflöst (z.B. wegen sehr großer Flughöhe).
- Es wurde angenommen, daß die einzelnen Elemente (Laubreihen, Boden) Lambertsche Oberflächen besitzen. In Wirklichkeit hat jede dieser Oberflächen spezifische richtungsabhängige Reflexionseigenschaften, die (näherungsweise) experimentell zu bestimmen oder aber durch weiter ins Detail gehende Modellrechnungen zu ermitteln wären.
- Mehrfachreflexionen wurden vernachlässigt. Ihre Berücksichtigung ist schwierig und mit hohem Rechenaufwand verbunden.

Dieses Beispiel sollte einen Eindruck davon vermitteln, wie kompliziert und vielparametrig die Reflexionsfunktion natürlicher Oberflächen ist. Eine rein experimentelle Bestimmung der Reflexionsfunktion ist in vielen Fällen unmöglich, da die Bestrahlung der Oberfläche (z.B. eines Waldbestandes) aus beliebig zu wählenden Richtungen nicht realisiert werden kann. Der praktischen Messung zugänglich ist nur der gerichtete Reflexionsgrad bei (wech-



selnden) natürlichen Einstrahlungsverhältnissen, die nur zum Teil bewußt gewählt werden können (Sonnenstand, Tageszeit). Demgegenüber wäre die Kenntnis der Reflexionsfunktion vorteilhaft, da sie die Berechnung des gerichteten Reflexionsgrades für beliebige natürliche Einstrahlungsverhältnisse ermöglichte. Dafür können Modellrechnungen der hier exemplarisch demonstrierten Art helfen, wobei die Modellparameter zum Teil experimentell bestimmbar sind. Weiterführende Literatur zur Reflexionsfunktion und zum gerichteten Reflexionsgrad: Slater (1980), Kriebel et al. (1975).

Wir wollen nun noch den spektralen Reflexionsgrad  $\rho(\lambda)$  wichtiger Oberflächentypen näher untersuchen:

Die grüne Vegetation hat im Wellenlängenbereich der optischen Strahlung ein sehr charakteristisches spektrales Reflexionsvermögen, das im wesentlichen durch die Reflexionseigenschaften der Blattorgane bestimmt wird (Bild 2.5-9). Die Blattorgane sind für die Strahlung teilweise transparent. Sie weisen infolge des Zellaufbaues vielfältige Diskontinuitäten des Brechungsindex auf (wasserhaltige Zellwände - luftgefüllte Zwischenräume), an denen Reflexionen stattfinden. Die auftreffende Strahlung wird dadurch aus ihrer ursprünglichen Richtung abgelenkt und in alle Richtungen gestreut (Volumsstreuung, siehe 2.4). Dieser Mechanismus der Vielfachreflexionen kann mit der Rückstreuung von sichtbarem Licht an den Flüssigkeitslamellen von Schaumstrukturen verglichen werden (weißer Schaum auf einem Glas Bier !).

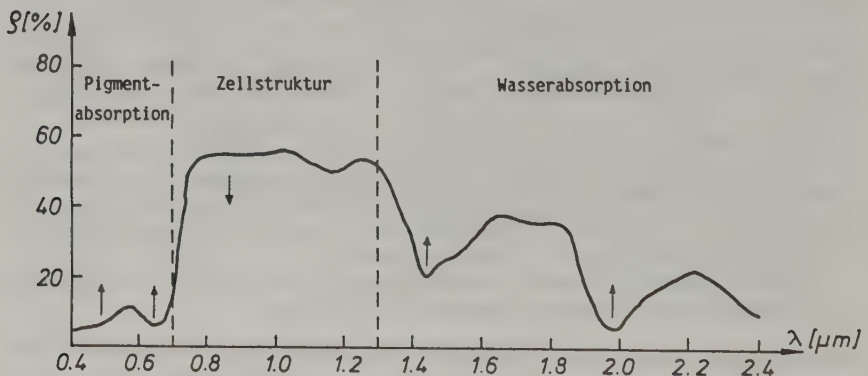


Bild 2.5-9: Spektraler Reflexionsgrad eines grünen Laubbaumblattes

Der Effekt der Volumsrückstreuung wird überlagert von Absorptionsphänomenen. Im Bereich sichtbaren Lichts absorbieren Blattpigmente, vor allem Chlorophyll bei  $0.45\ \mu\text{m}$  und bei  $0.65\ \mu\text{m}$  (vergleiche Bild 2.4-4). Blaues und rotes Licht wird also beim Durchgang durch die teilweise transparenten Blattorgane herausgefiltert, für grünes Licht ist der Transmissionsgrad relativ groß. Blattorgane sind sozusagen ein "Grünfilter" (3.1.1.4.1). Die durch Streuung und Reflexion von tieferliegenden Blattschichten und Blättern zurückgeworfene Strahlung hat ein relatives Maximum im grünen Spektralbereich, weshalb die Vegetation dem Auge grün erscheint. Im anschließenden nahen Infrarot fehlen Pigmentabsorptionen, weshalb der Transmissionsgrad der Blattschichten und damit wegen der starken Volumsrückstreuung auch der Reflexionsgrad der Blätter hier sehr hoch ist. Im mittleren Infrarot dominieren schließlich Wasserabsorptionen (vor allem bei  $1.4\ \mu\text{m}$ ,  $1.9\ \mu\text{m}$  und  $2.7\ \mu\text{m}$ ).

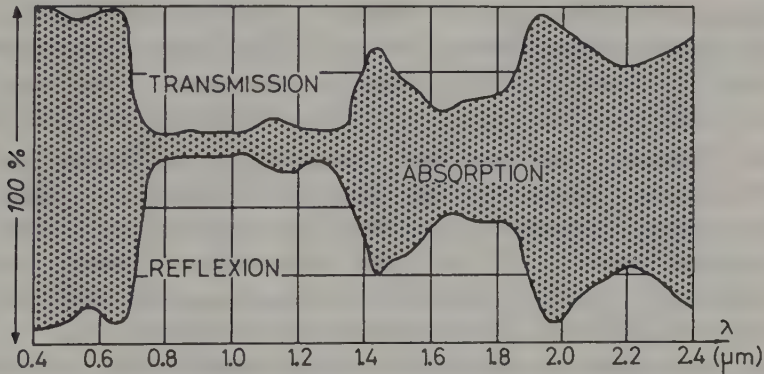


Bild 2.5-10: Reflektierte, absorbierte und transmittierte Strahlung als Anteile der auf ein Laubbaumblatt auftreffenden Strahlung (Manual of Remote Sensing, 1983)

Bild 2.5-10 veranschaulicht die reflektierte, die absorbierte und die transmittierte Strahlung als Anteile der auf ein Laubbaumblatt auftreffenden Strahlung. Für den Reflexionsgrad  $\rho(\lambda)$ , den Absorptionsgrad  $\alpha(\lambda)$  und den Transmissionsgrad  $\tau(\lambda)$  gilt der mit Gleichung (2.5-3) formulierte Zusammenhang.

Der spektrale Reflexionsgrad von Pflanzenbeständen hängt nicht nur vom Reflexionsgrad der Einzelblätter, sondern auch von deren Dichte, räumlicher Anordnung und Vorzugsorientierung, vom Reflexionsgrad und dem von oben sichtbaren Anteil von Rindenoberflächen usw. ab.

Bei zunehmender Schädigung der Vegetation zeigen sich im allgemeinen folgende Trends der Reflexionsgradänderung: Im Bereich sichtbaren Lichts, insbesondere aber im roten Spektralbereich, nimmt der Reflexionsgrad zu, da bei eingeschränkter Photosynthese der Chlorophyllgehalt und damit die Chlorophyllabsorptionen verringert werden. Die mit einer Schädigung meist einhergehende Veränderung der Zellstruktur bewirkt demgegenüber eine Abnahme des Reflexionsgrades im nahen Infrarot. Im mittleren Infrarot schließlich steigt der Reflexionsgrad bei zunehmender Schädigung wegen der Abnahme des Wassergehaltes wieder an (siehe Pfeile im Bild 2.5-9).

Vegetationsloser Boden hat im Wellenlängenbereich der optischen Strahlung ein viel weniger strukturiertes spektrales Reflexionsvermögen. Der Reflexionsgrad steigt generell im Sichtbaren, im nahen Infrarot sowie teilweise noch im mittleren Infrarot mit zunehmender Wellenlänge an und nimmt vom mittleren Infrarot zum thermischen Infrarot hin wieder ab. Die folgenden allgemeinen Gesetzmäßigkeiten und Tendenzen können festgehalten werden:

- Die chemische Zusammensetzung der mineralischen Bodenbestandteile beeinflusst das spektrale Reflexionsvermögen des Bodens. So verleiht z.B. Eisenoxyd, das grünes Licht bevorzugt absorbiert und rotes Licht bevorzugt reflektiert, dem Boden eine charakteristische rötliche Färbung.
- Mit steigendem Wassergehalt sinkt das Reflexionsvermögen des Bodens: Die auftreffende Strahlung wird im dünnen, die einzelnen Bodenteilchen umhüllenden Wasserfilm zum Teil durch Totalreflexion "gefangen". Darüber hinaus treten bei den Wellenlängen 1.4  $\mu\text{m}$ , 1.9  $\mu\text{m}$  und 2.7  $\mu\text{m}$  die schon von der Vegetation her bekannten Wasserabsorptionsbanden auf.
- Die Teilchengröße der mineralischen Bodenbestandteile kann vom Submikrometerbereich (Ton) bis zum Millimeterbereich (Sand) variieren. Mit abnehmender Teilchengröße steigt der Reflexionsgrad des Bodens, da die Oberfläche "glatter" wird und die Schattenanteile abnehmen. Mit abnehmender Teilchengröße steigt jedoch auch das Wasserhaltevermögen des Bodens, wodurch es - siehe oben - zur gegenläufigen Tendenz einer Verringerung des Reflexionsgrades kommen kann.
- Mit steigendem Gehalt an organischen Bestandteilen sinkt das Reflexionsvermögen des Bodens vor allem im Sichtbaren (humusreiche Schwarzerde !). Je weiter die Verrottung pflanzlicher Rückstände fortgeschritten ist, desto stärker sinkt auch das Reflexionsvermögen im nahen und mittleren Infrarot.

Das Bild 2.5-11 illustriert die hier zusammengestellten Gesetzmäßigkeiten. Der Vollständigkeit halber ist dort auch die spektrale Signatur für Schnee angegeben.

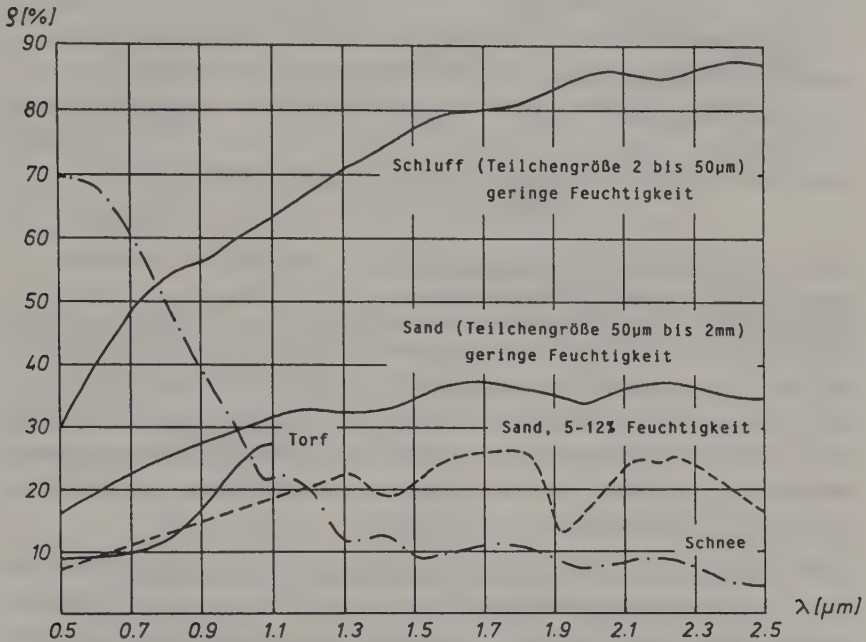


Bild 2.5-11: Spektraler Reflexionsgrad von vegetationslosem Boden (Swain-Davis, 1978, Curran, 1985) und Schnee

Klare, tiefe Gewässer reflektieren nur sichtbares Licht. Im Infrarotbereich ist ihr Reflexionsgrad praktisch gleich Null. Mit zunehmender Trübung einerseits und mit abnehmender Tiefe andererseits steigt der Reflexionsgrad generell an: Trübe oder seichte Gewässer können auch im nahen Infrarot meßbare Werte des Reflexionsgrades aufweisen (Bild 2.5-12).

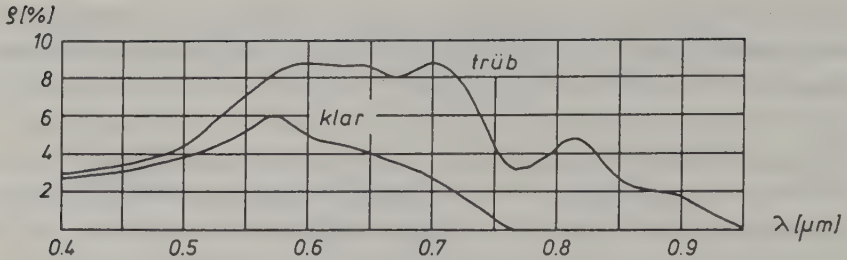


Bild 2.5-12: Spektraler Reflexionsgrad von Gewässern (Swain-Davis, 1978)

## 2.6 Thermische Emission von Strahlung

Jeder Körper mit einer über dem absoluten Nullpunkt ( $-273.2\text{ }^{\circ}\text{C} = 0\text{ Kelvin}$ ) liegenden Temperatur sendet elektromagnetische Strahlung aus. Der Grund dafür liegt in der beständigen ungeordneten Bewegung der Atome und Moleküle, die von der Temperatur abhängt. Die in den Atomen und Molekülen enthaltenen elektrischen Ladungen werden bei diesen ungeordneten Bewegungen andauernd beschleunigt, verzögert und aus ihrer Bewegungsrichtung abgelenkt und strahlen daher elektromagnetische Energie ab.

Im Teilchenmodell kann man sich diesen Vorgang folgendermaßen vorstellen: Die thermische Bewegungsenergie der Moleküle teilt sich auch den Elektronen mit und bewirkt, daß Teilchen im Energieniveauschema umso eher auch in höheren Niveaus vorkommen, je höher die Temperatur ist. Von dort "fallen" sie dann unter Aussendung von Photonen spontan auf nicht besetzte niedrigere Niveaus herab.

Die von einem Körper ausgesendete Strahlungsintensität ist nicht nur von der Temperatur des Körpers, sondern auch von seinen Materialeigenschaften und seiner Oberflächenbeschaffenheit abhängig: Es können nur solche Photonenenergien abgestrahlt werden, denen Energiedifferenzen im Energieniveauschema entsprechen. Es ist also zu erwarten, daß bevorzugt genau jene Energien abgestrahlt werden, die der Körper auch bevorzugt absorbiert. Darüberhinaus ist der Einfluß der Oberflächenbeschaffenheit verständlich: Eine spiegelnde Oberfläche, die von außen kommende Strahlung reflektiert, wird auch die aus dem Innern des Körpers kommende Strahlung wieder nach innen zurückwerfen. Bei genauerer quantitativer Betrachtung zeigt es sich, daß die Intensität der Strahlungsemission unterschiedlicher Körper gleicher Temperatur proportional zu ihrem Absorptionsvermögen ist. Man definiert



daher einen (spektralen) Emissionsgrad

$$\varepsilon(\lambda) = \alpha(\lambda), \quad (2.6-1)$$

welcher die Material- und Oberflächenabhängigkeit der Strahlungsemission beschreibt. Die maximal mögliche thermische Emission ist demnach für  $\varepsilon = \alpha = 1$  gegeben, d.h. für einen Körper, der die gesamte auffallende Strahlung absorbiert, also für einen "schwarzen Körper". Dabei ist jedoch die Wellenlängenabhängigkeit zu berücksichtigen: Ein im Sichtbaren schwarzer Körper muß nicht bei allen Wellenlängen die gesamte auftreffende Strahlung absorbieren, und ein im Infrarot schwarzer Körper kann im Bereich sichtbaren Lichts durchaus eine helle Farbe haben oder sogar weiß sein.

Die thermische Ausstrahlung eines schwarzen Körpers ist demnach nur von der Temperatur T des Körpers abhängig und wird durch das Plancksche Strahlungsgesetz beschrieben: Die spektrale Strahldichte eines schwarzen Körpers ist:

$$L_{SK,\lambda}(T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \left( e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)^{-1} \quad (2.6-2)$$

$$c_1 = 2 h \cdot c^2 \text{ sr}^{-1} = 1.19 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{sr}^{-1} \quad (2.6-2a)$$

$$h \hat{=} \text{Plancksches Wirkungsquantum} = 6.625 \cdot 10^{-34} \text{ W} \cdot \text{s}^2 \quad (2.2-4)$$

$$c \hat{=} \text{Lichtgeschwindigkeit} = 2.998 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (2.2-1)$$

$$c_2 = c \cdot h / k = 1.439 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K} \quad (K \hat{=} \text{Kelvin}) \quad (2.6-2b)$$

$$k \hat{=} \text{Boltzmannsche Konstante} = 1.3805 \cdot 10^{-23} \text{ W} \cdot \text{s} \cdot \text{K}^{-1}$$

Zahlenbeispiel:  $T = 300 \text{ K}$ ,  $\lambda = 10 \text{ } \mu\text{m}$ .

$$\begin{aligned} L_{SK,\lambda=10\mu\text{m}}(300\text{K}) &= \frac{1.19 \cdot 10^{-16}}{(10 \cdot 10^{-6})^5} \left( e^{\frac{1.439 \cdot 10^{-2}}{10 \cdot 10^{-6} \cdot 300}} - 1 \right)^{-1} = 1.19 \cdot 10^9 (e^{4.797} - 1)^{-1} = \\ &= 9.9 \cdot 10^6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{sr}^{-1} = 9.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1} \end{aligned}$$

Die spektrale Strahldichte  $L_\lambda(T)$  eines beliebigen Körpers ergibt sich zu:

$$L_\lambda(T) = \varepsilon(\lambda) \cdot L_{SK,\lambda}(T) \quad (2.6-3)$$

Unter Beachtung der Gleichungen (2.5-4) und (2.6-1) ergibt sich folgender interessanter Zusammenhang zwischen Emissionsgrad und Reflexionsgrad:

$$\boxed{\varepsilon(\lambda) = \alpha(\lambda) = 1 - \rho(\lambda)} = \frac{L_{\lambda}(T)}{L_{SK,\lambda}(T)} \quad (2.6-4)$$

Für das Emissionsvermögen eines teilweise transparenten Körpers (z.B. der Atmosphäre) ergibt sich aus (2.5-3) und (2.6-1) mit  $\rho(\lambda) = 0$  die Beziehung

$$\varepsilon(\lambda) = \alpha(\lambda) = 1 - \tau(\lambda) \quad (2.6-4a)$$

Das Diagramm 2.6-1 veranschaulicht das Plancksche Strahlungsgesetz (2.6-2) in graphischer Form. Es zeigt die spektrale Strahldichte des schwarzen Körpers für vier verschiedene Temperaturen: Bei 273 K (0 °C) liegt das Maximum der emittierten Strahlung bei 10.6 µm, also im Infrarotbereich fernab vom Sichtbaren. Mit zunehmender Temperatur steigt die Strahldichte bei allen Wellenlängen; ihr Maximum verschiebt sich zu kürzeren Wellenlängen. Ein Körper von 1000 K (727 °C) emittiert bevorzugt bei 2.9 µm. Die Kurve der spektralen Emission reicht nun schon deutlich in den Bereich sichtbaren Lichts hinein: Bei 0.7 µm (Rot) ist die spektrale Strahlstärke für T = 1000 K schon etwa 0.2 Tausendstel des bei 2.9 µm auftretenden Maximalwertes (man beachte die logarithmische Teilung der Ordinate !); der Körper beginnt also "rot zu glühen". Bei 6000 K schließlich liegt das Maximum der Emission bei 0.48 µm, d.h. mitten im Bereich sichtbaren Lichts. Die Kurve ist in der Umgebung des Maximums relativ flach, der Körper sendet daher weißes Licht aus: Er ist weißglühend. 6000 K ist ungefähr die Oberflächentemperatur der Sonne: Da die Sonne näherungsweise als schwarzer Körper angesehen werden kann, gibt diese Kurve die Intensität und Spektralverteilung der Sonnenstrahlung an. Es ist natürlich kein Zufall, daß das Maximum der Sonnenstrahlung im Bereich sichtbaren Lichts liegt; vielmehr hat sich das menschliche Auge im Laufe der Evolution an die Sonnenstrahlung angepaßt.

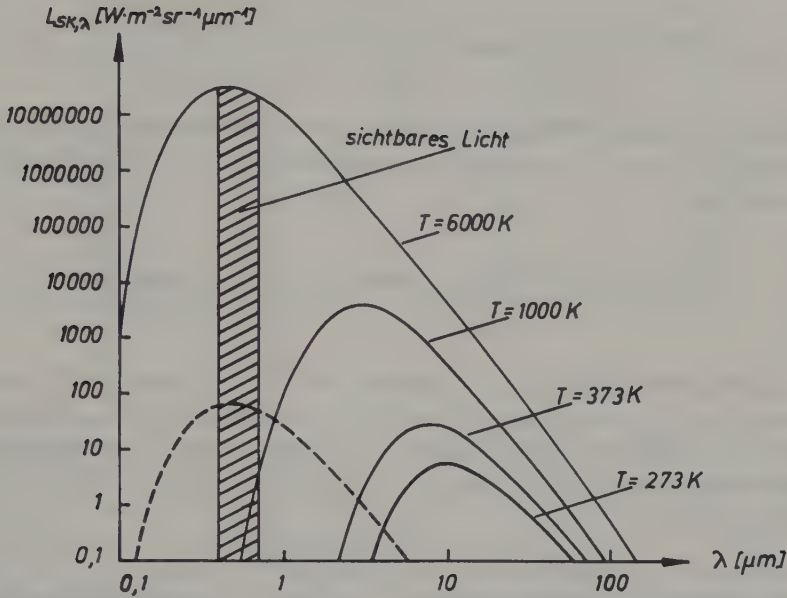


Bild 2.6-1: Spektrale Strahldichte von schwarzen Körpern verschiedener Oberflächentemperaturen

Die Kurven im Bild 2.6-1 geben die spektrale Strahldichte an der Oberfläche der Körper an. Insbesondere stellt die Kurve für den schwarzen Körper der Temperatur 6000 K die spektrale Strahldichte auf der Sonnenoberfläche dar. Die Bestrahlungsstärke durch Sonnenstrahlung auf der Erdoberfläche (genauer: für ein senkrecht zur Sonnenstrahlung stehendes Flächenelement außerhalb der Erdatmosphäre) ergibt sich daraus gemäß folgender Überlegung: Es sei  $d_s$  der Durchmesser der Sonne,  $r_s$  der Abstand Erde-Sonne. Eine Fläche  $F$  auf der Erdoberfläche empfängt laut (2.3-9) den Strahlungsfluß

$$\dot{q}_{So,\lambda} = L_{SK,\lambda}(T=6000\text{K}) \frac{d_s^2 \pi}{4} \frac{F}{r_s^2} .$$

Aus dem von der Sonne kommenden Strahlungsfluß  $\dot{q}_{So,\lambda}$  ergibt sich folgende Bestrahlungsstärke  $E_{E,\lambda}$  auf der Erdoberfläche:

$$E_{E,\lambda} = \frac{S_{So,\lambda}}{F} = L_{SK,\lambda}(T=6000K) \frac{d_S^2 \pi}{4r_S^2}$$

Nimmt man eine Lambertsche Oberfläche mit einem Reflexionsgrad  $\rho$  an, so ist die durch reflektierte Sonnenstrahlung gegebene spektrale Strahldichte der Erdoberfläche

$$L_{E,\lambda} = \frac{1}{\pi} \rho \cdot E_{E,\lambda} = \frac{1}{\pi} \rho \frac{d_S^2 \pi}{4r_S^2} L_{SK,\lambda}(T=6000K) = \frac{\rho \cdot d_S^2}{4r_S^2} L_{SK,\lambda}(T=6000K)$$

Mit  $d_S = 1.3914 \cdot 10^6$  km,  $r_S = 149.6 \cdot 10^6$  km und  $\rho = 0.1$  ergibt sich, daß die Strahldichte  $L_{E,\lambda}$  der Erdoberfläche infolge Reflexion von Sonnenstrahlung den Bruchteil  $\rho \cdot d_S^2 / (4r_S^2) = 2.16 \cdot 10^{-6}$  der Strahldichte  $L_{So,\lambda}$  der Sonnenoberfläche beträgt. Die entsprechende Kurve  $L_{E,\lambda}$  ist im Bild 2.6-1 strichliert eingetragen.

Man erkennt nun deutlich die Spektralverteilung der insgesamt von der Erdoberfläche nach oben ausgehenden Strahlung: Es ist einerseits reflektierte Sonnenstrahlung mit einem Maximum im Bereich sichtbaren Lichts. Diese Strahlung gibt uns in der Fernerkundung Auskunft über das Reflexionsvermögen der reflektierenden Objekte. Andererseits emittieren die Objekte auf der Erdoberfläche Strahlung infolge ihrer Eigenwärme. Diese Strahlung hat ihr Maximum bei etwa 10  $\mu$ m Wellenlänge und enthält Information über die Temperatur der Geländeoberfläche. In der optischen Fernerkundung wählen wir zwischen folgenden beiden Informationsmöglichkeiten: Im Wellenlängenbereich des sichtbaren, im nahen Infrarot und auch im mittleren Infrarot erfassen wir reflektierte Sonnenstrahlung, im thermischen Infrarot emittierte Strahlung.

Möchte man die Oberflächentemperatur eines Körpers durch Messung der emittierten Strahlung bestimmen, so muß der spektrale Emissionsgrad  $\epsilon(\lambda)$  bekannt sein. Der spektrale Emissionsgrad  $\epsilon(\lambda)$  der meisten Körper ist im Bereich des thermischen Infrarot - nicht aber im mittleren Infrarot ! - nur wenig kleiner als Eins (siehe Tab. 2.6-2). Eine Ausnahme bilden Metalle, vor allem, wenn sie eine glatte Oberfläche haben.

Wellenlängenbereich [μm]	1.8 - 2.7	3 - 5	8 - 14
Grünes Laub	0.67	0.90	0.92
Sand	0.56	0.82	0.93
Asphalt			0.96
Wasser			0.99
Granit			0.82
Basalt			0.90
Eis			0.98
menschliche Haut			0.98
Glasplatte			0.98
Sperrholzplatte			0.96

Tab. 2.6-2: Emissionsgrad einiger Stoffe (Stahl, Miosga, 1980)

Die "scheinbare" Temperatur eines Körpers, die man durch Messung der emittierten Strahlung unter der Annahme  $\epsilon = 1$  erhält, heißt Strahlungstemperatur des Körpers. Die Strahlungstemperatur ist immer kleiner, für einen schwarzen Körper höchstens gleich der wahren Temperatur.

Zahlenbeispiel: Wie groß ist die Strahlungstemperatur eines Körpers, dessen spektraler Emissionsgrad  $\epsilon(\lambda=10\mu\text{m}) = 0.9$  und dessen wahre Temperatur  $18^\circ\text{C}$  ist?

Strahldichte des schwarzen Körpers mit der Temperatur  $18^\circ\text{C}$  (2.6-2):

$$L_{\text{SK}, \lambda=0.00001(T=291.16\text{K})} = 8.56 \cdot 10^6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{sr}^{-1}.$$

Strahldichte eines Körpers mit dem Emissionsgrad  $\epsilon = 0.9$  (2.6-3):

$$L_{\lambda=0.00001} = 0.9 \cdot 8.56 \cdot 10^6 = 7.70 \cdot 10^6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{sr}^{-1}.$$

Aus dieser Strahldichte folgt unter der Annahme  $\epsilon = 1$  aus (2.6-3) und (2.6-2) folgende Strahlungstemperatur:

$$T_{\text{Str.}} = 285.1 \text{ K} \hat{=} 11.9^\circ\text{C}$$

Ergebnis: Die Strahlungstemperatur kann sich von der wahren Temperatur um mehrere Grad unterscheiden. Soll die wahre Temperatur einer Oberfläche durch Fernerkundung bestimmt werden, so muß der Emissionsgrad der Oberfläche sehr genau bekannt sein.

Wir fragen uns, wie sich ein relativer Fehler  $\Delta\epsilon/\epsilon$  des Emissionsgrades auf den relativen Fehler  $\Delta T/T$  der durch Strahlungsmessung ermittelten Oberflächentemperatur auswirkt: Setzt man die Gleichung (2.6-2) in die Gleichung (2.6-3) ein, so erhält man durch Differentiation und unter Beachtung, daß für das thermische Infrarot und für übliche Temperaturen der Erdoberfläche  $1 \ll \exp(c_2/(\lambda \cdot T))$ :

$$\left| \frac{dT}{T} \right| = \frac{\lambda \cdot T}{c_2} \left| \frac{d\epsilon}{\epsilon} \right| \quad (2.6-5)$$

Für  $\lambda = 10 \mu\text{m}$  und  $T = 300 \text{ K}$  ergibt sich daraus:

$$\left| \frac{dT}{T} \right| \approx 0.2 \left| \frac{d\epsilon}{\epsilon} \right|.$$



Ein Fehler  $d\epsilon/\epsilon = 1\%$  ergibt deshalb folgenden Fehler bei der Temperaturbestimmung:  $dT = 300 \cdot 0.2 \cdot 0.01 = 0.6 \text{ K} \hat{=} 0.6^\circ\text{C}$ . Mit der Formel (2.6-5) hätte man übrigens das oben bearbeitete Beispiel "Unterschied der Strahlungstemperatur gegenüber wahrer Temperatur" sehr einfach lösen können:  $\Delta\epsilon/\epsilon$  ist dort  $10\%$ , d.h.  $dT = 300 \cdot 0.2 \cdot 0.1 \approx 6^\circ\text{C}$ .

Aufgabe 2.6-1: Eine Sandfläche habe im thermischen Infrarot einen Reflexionsgrad  $\rho(\lambda=10\mu\text{m}) = 0.07$ . Bei örtlichen Messungen wurde eine Temperatur von  $15^\circ\text{C}$  festgestellt. Man berechne die Strahlungstemperatur des Sandes. Wie unsicher ist die Temperaturbestimmung mittels Fernerkundung, wenn der Reflexionsgrad nur auf  $\pm 0.02$  genau bekannt ist?

Die thermische Emission kann auch im Mikrowellenbereich gemessen werden, obwohl sie dort viel schwächer ist als im Infrarotbereich. Für Mikrowellen ist  $c_2/(\lambda \cdot T) \ll 1$ , daher  $\exp(c_2/(\lambda \cdot T)) = 1 + c_2/(\lambda \cdot T)$ . Das Plancksche Strahlungsgesetz vereinfacht sich daher zu

$$L_{\text{SK},\lambda}(T) = \frac{c_1}{c_2 \cdot \lambda^4} T \stackrel{(2.6-2ab)}{=} \frac{2c \cdot k}{\lambda^4} T \quad (2.6-6)$$

Der Emissionsgrad der meisten Körper ist im Mikrowellenbereich wesentlich von Eins verschieden. Ein relativer Fehler  $\Delta\epsilon/\epsilon$  des Emissionsgrades wirkt sich im Mikrowellenbereich wesentlich ungünstiger als im thermischen Infrarot aus. Mittels (2.6-6) bekommt man nämlich mit den weiter oben angestellten Überlegungen folgenden Zusammenhang:

$$\left| \frac{dT}{T} \right| = \left| \frac{d\epsilon}{\epsilon} \right| \quad \text{oder} \quad T_{\text{Str.}} = \epsilon \cdot T \quad (2.6-7)$$

Aufgabe 2.6-2: Man ermittle die Strahlungstemperatur eines Körpers des Emissionsgrades  $\epsilon = 0.5$  und der wahren Temperatur  $20^\circ\text{C}$  bei  $\lambda = 30 \text{ cm}$  (Ergebnis:  $T_{\text{Str.}} = 146.6 \text{ K} \hat{=} -126.5^\circ\text{C} !!$ )

Aus dem Planckschen Strahlungsgesetz (2.6-2) lassen sich folgende weitere hilfreiche Aussagen ableiten: Setzt man  $dL_{\text{SK},\lambda}/d\lambda = 0$ , was übrigens nur nach längeren Umformungen gelingt, so erhält man das Wiensche Verschiebungsgesetz:

$\lambda_{\text{max}} \cdot T = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}$

(2.6-8)

Anwendung: a) Das menschliche Auge ist auf die Sonnenstrahlung eingestellt, die etwa bei  $\lambda \approx 0.5 \mu\text{m}$  ihr Maximum hat. Mit dem Wienschen Verschiebungsgesetz ergibt sich daraus, daß der Strahler "Sonne" eine Oberflächentemperatur haben muß von:  
 $T_{\text{So}} \approx 2898/0.5 \approx 5800 \text{ K}$ .

- b) Die Erddecke hat eine Temperatur in der Nähe von 300 K. Mit dem Wienschen Verschiebungsgesetz ergibt sich daraus jene Wellenlänge, mit der die Erde am stärksten strahlt:

$$\lambda_{\max} = 2898/300 = 9.7 \mu\text{m}.$$

Aufgabe 2.6-3: Man ermittle die Wellenlänge mit der stärksten Strahlungsintensität a) bei einem Waldbrand, bei dem Temperaturen von ca. 250 °C auftreten und b) bei einer Wasserfläche um den Gefrierpunkt.

Eine Integration des Planckschen Strahlungsgesetzes über den gesamten Wellenlängenbereich ergibt das Stefan-Boltzmannsche Strahlungsgesetz

$$L_{\text{SK}} = \frac{\sigma}{\pi} T^4, \quad (2.6-9)$$

wobei  $\sigma = 5.6693 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-4}$  die Stefan-Boltzmannsche Strahlungskonstante ist. ( $\pi$  ist mit der Dimension [sr] anzunehmen, damit die Gleichung auch dimensionsmäßig stimmt.) Dieses Gesetz zeigt die starke Abhängigkeit der Strahldichte  $L_{\text{SK}}$  des schwarzen Körpers von der Temperatur  $T$ . Da ein Fernerkundungssensor meist selektiv in bestimmten Wellenlängenbereichen mißt, kann dieses Gesetz allerdings nicht zur Temperaturbestimmung mit Fernerkundungsmethoden verwendet werden ! Es kann jedoch für die Auswertung von Fernerkundungsdaten über Oberflächentemperaturen im Hinblick auf Wärmehaushaltsanalysen, Mikroklimauntersuchungen usw. nützlich sein.

## 2.7 Wechselwirkung von elektromagnetischer Strahlung und Atmosphäre

Elektromagnetische Strahlung wird in der Atmosphäre teilweise absorbiert und gestreut. Um die Beeinflussung von Fernerkundungsaufnahmen aus verschiedenen Höhen durch atmosphärische Effekte richtig einschätzen zu können, sind zunächst einige Daten über den Aufbau der Atmosphäre interessant:

Die Dichte der Atmosphäre nimmt natürlich mit der Höhe ab. Die Teilchendichte  $n(z)$  [Moleküle/m<sup>3</sup>] der meisten Atmosphärenbestandteile kann durch eine exponentielle Höhenabhängigkeit näherungsweise beschrieben werden:

$$n(z) = n(0) \cdot e^{-\frac{z}{H_A}}, \quad (2.7-1)$$

wobei  $z$  die Höhe über Meeresniveau,  $n(0)$  die Teilchendichte auf Meeresniveau und  $H_A$  ein Parameter zur Charakterisierung der Höhenverteilung ist. Für die Gesamtatmosphäre gilt etwa  $H_A = 8$  km; bei  $z = 8$  km ist die Atmosphäre also um den Faktor  $1/e$  "dünner".

Die Bestandteile der Atmosphäre sind im wesentlichen:

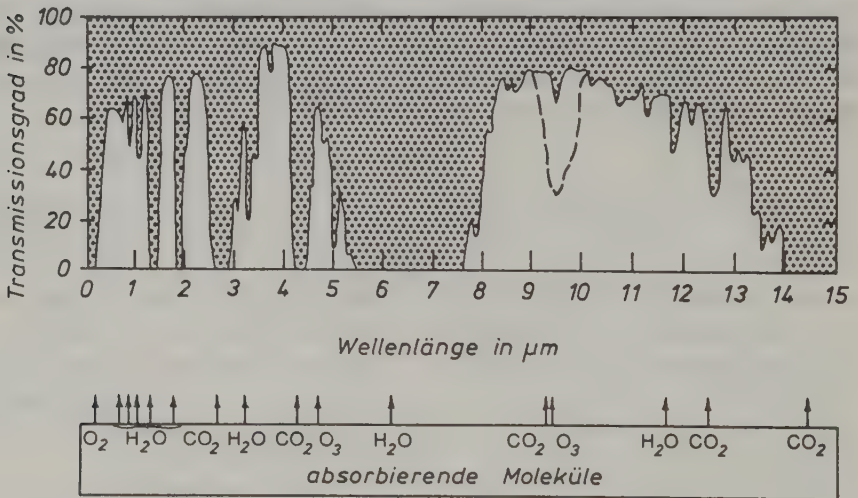


Bild 2.7-1: Transmissionsgrad einer klaren Atmosphäre von Meeresniveau bis 2000 m Höhe

- Die "permanenten Gase" Stickstoff, Sauerstoff und Edelgase (Argon): Sie kommen in allen Höhen zu etwa gleichen Anteilen gemäß (2.7-1) mit  $H_A = 8$  km vor und absorbieren relativ wenig. Eine Ausnahme bildet O<sub>2</sub> mit

einem schmalen, scharfen Absorptionsbereich bei  $\lambda = 760 \text{ nm}$  (der bei einer Breite von etwa  $5 \text{ nm}$  jedoch nur bei spektral hochauflösenden Fernerkundungsaufnahmen stört) sowie weiteren Absorptionen im Bereich kurzer Mikrowellen (siehe Bild 3.4-10).

- Wasserdampf mit variabler Konzentration: Im Durchschnitt kann eine exponentielle Höhenabnahme mit  $H_A = 2.5 \text{ km}$  angenommen werden. Die Konzentration in Meereshöhe schwankt zwischen ungefähr  $10^{-2} \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  und  $30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ ; der Durchschnittswert beträgt  $10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ . Wasserdampf hat ausgeprägte Absorptionsbereiche im Infraroten und bei kurzen Mikrowellen (Bild 3.4-10) und ist hauptverantwortlich dafür, daß sich die Fernerkundung auf die atmosphärischen Fenster beschränken muß.
- Kohlendioxyd ( $\text{CO}_2$ ) hat ebenso wie Wasserdampf Bereiche starker Absorption im Infraroten.
- Ozon ( $\text{O}_3$ ) kommt vor allem in Höhen zwischen  $15$  und  $30 \text{ km}$  vor und besitzt eine deutliche Absorption bei  $\lambda = 9.5 \mu\text{m}$ , mitten im atmosphärischen Fenster des thermischen Infrarot. Diese Ozonabsorption muß bei der Auswertung thermischer Infrarot-Satelliten-Bilder berücksichtigt werden. Aufnahmen vom Flugzeug aus werden durch diese Ozonabsorption nicht beeinflusst.
- Teilchen verschiedenster Größen (Teilchendurchmesser  $0.01$  bis  $100 \mu\text{m}$ ), sogenannte Aerosole, kommen als Dunst, Staub, Nebel und Wolken besonders in niedrigen Höhen (bis wenige  $\text{km}$ ) bei stark wechselnden Konzentrationen vor und verursachen vor allem Streuung der Strahlung.

Bild 2.7-1 zeigt den spektralen Transmissionsgrad der Atmosphäre und die Absorptionen der wichtigsten Atmosphärenbestandteile.

Die Streuung wird quantitativ durch die (spektrale) Volumsstreufunktion  $\beta_\theta(\lambda)$  beschrieben:

$$I_\lambda(\theta) = E_\lambda \cdot \beta_\theta(\lambda) \cdot V \quad (2.7-2)$$

$I_\lambda(\theta)$  ist die spektrale Strahlstärke der vom Gasvolumen  $V$  in Richtung  $\theta$  gestreuten Strahlung;  $E_\lambda$  ist die auf das streuende Volumen treffende spektrale Bestrahlungsstärke. Die Einheit von  $\beta_\theta(\lambda)$  ist  $\text{sr}^{-1}\text{m}^{-1}$ .

Durch Integration über alle Richtungen des Raumes (mit Ausnahme der Einfallrichtung) erhält man den spektralen Streukoeffizienten  $\beta(\lambda)$ :

$$\beta(\lambda) = \int_{\text{Raum}} \beta_{\theta}(\lambda) \cdot d\Omega \quad (2.7-3)$$

Der spektrale Streukoeffizient  $\beta(\lambda)$  hat die Dimension Länge<sup>-1</sup> und gibt den Anteil der Strahlung an, die pro Längeneinheit der Weglänge aus ihrer ursprünglichen Richtung abgelenkt wird:

$$\begin{aligned} d\dot{\Phi}_{\lambda} &= - \int_{\text{Raum}} dI_{\lambda}(\theta) \cdot d\Omega \stackrel{(2.7-2)}{=} - \int_{\text{Raum}} E_{\lambda}(x) \cdot \beta_{\theta}(\lambda) \cdot F \cdot dx \cdot d\Omega \stackrel{(2.3-2)}{=} \\ &= - \frac{\dot{\Phi}_{\lambda}(x)}{F} \cdot F \cdot dx \int_{\text{Raum}} \beta_{\theta}(\lambda) \cdot d\Omega \stackrel{(2.7-3)}{=} - \beta(\lambda) \cdot \dot{\Phi}_{\lambda}(x) \cdot dx \end{aligned} \quad (2.7-4)$$

$\dot{\Phi}_{\lambda}(x) = F \cdot E_{\lambda}(x)$  ist hier der in x-Richtung auf ein Gasvolumen  $dV = F \cdot dx$  auffallende Strahlungsfluß und  $d\dot{\Phi}_{\lambda}$  ist die Abnahme dieses Strahlungsflusses durch Streuung im Volumen  $dV$ , d.h. entlang der Wegstrecke  $dx$ . Der sich in x-Richtung in einem Gas ausbreitende spektrale Strahlungsfluß  $\dot{\Phi}_{\lambda}(0)$  wird daher gemäß

$$\dot{\Phi}_{\lambda}(x) = \dot{\Phi}_{\lambda}(0) \cdot e^{-\beta(\lambda) \cdot x} \quad (2.7-5)$$

geschwächt (siehe Anhang 2.4-1).

Durch Vergleich mit (2.4-4) erkennt man, daß die Abschwächung formal wie eine Absorption wirkt. Man faßt daher Absorption und Streuung zur Extinktion zusammen und definiert den spektralen Extinktionskoeffizienten

$$\beta_{\text{ext}}(\lambda) = \mu(\lambda) + \beta(\lambda) \quad (2.7-6)$$

sodaß ein Strahlungsfluß  $\dot{\Phi}_{\lambda}(0)$  insgesamt gemäß

$$\dot{\Phi}_{\lambda}(x) = \dot{\Phi}_{\lambda}(0) \cdot e^{-\beta_{\text{ext}}(\lambda) \cdot x} \quad (2.7-7)$$

geschwächt wird.

Das Produkt aus spektralem Extinktionskoeffizienten und Weglänge oder, bei nicht konstantem Extinktionskoeffizienten, das Wegintegral des spektralen Extinktionskoeffizienten ist die spektrale optische Dicke  $\tau_{\text{ext}}(\lambda)$  einer (Gas-)Schicht:



$$I_{\lambda}(x) = I_{\lambda}(0) \cdot e^{-\int_0^x \beta_{\text{ext}}(\lambda, x) \cdot dx} = I_{\lambda}(0) \cdot e^{-\tau_{\text{ext}}(\lambda)} \quad (2.7-8)$$

Damit lautet der spektrale Transmissionsgrad  $\tau(\lambda)$  einer (Gas-)Schicht:

$$\tau(\lambda) = \frac{I_{\lambda}(x)}{I_{\lambda}(0)} = e^{-\tau_{\text{ext}}(\lambda)} \quad (2.7-9)$$

Eine weitere, vor allem für die Praxis wichtige Kenngröße zur Beschreibung des Streuverhaltens der Atmosphäre ist die horizontale Sichtweite: Blickt man auf ein großes, dunkles (schwarzes) Objekt am Horizont (etwa auf einen dunklen Nadelwald an einem Berghang), so erscheint das Objekt um so heller, je stärker die Atmosphäre streut, da im Luftvolumen zwischen Auge und Objekt seitlich einfallende Strahlung in Richtung zum Auge des Beobachters abgelenkt wird. Definiert man die horizontale Sichtweite  $V_h$  als jene Distanz, aus der sich das schwarze Objekt noch mit einem Kontrast  $C = (L_H - L_O)/L_H$  von 2% vom Himmel abhebt ( $L_H \hat{=}$  Strahldichte des Himmels;  $L_O \hat{=}$  Strahldichte des Objekts), so kann man zeigen (Anhang 2.7-1), daß die Beziehung

$$V_h = \frac{3.91}{\beta_{\text{ext}}} \quad (2.7-10)$$

gilt. Bei "klarem Wetter" ist die horizontale Sichtweite größer als 15 km. Bei Sichtweiten zwischen etwa 1.2 km und 15 km spricht man von Dunst.

Obwohl die horizontale Sichtweite ein überraschend exaktes Maß für den Extinktionskoeffizienten  $\beta_{\text{ext}}$  im Bereich sichtbaren Lichtes darstellt, ist es doch problematisch, daraus auf die Streuverhältnisse entlang eines vertikalen Strahlenpfades zu schließen, wie er in der Fernerkundung interessant ist. Wir werden uns im Kapitel 3.5.3 noch mit diesem Thema befassen.

Wir wollen nun konkret die wichtigsten Streumechanismen in der Atmosphäre untersuchen:

Liegt die Teilchengröße weit unterhalb der Wellenlänge einer Strahlung, so ist der Streumechanismus dadurch gekennzeichnet, daß alle von der Strahlung zu Schwingungen angeregten Ladungen eines Teilchens in Phase schwingen. Es kommt zu einer speziellen Richtungs- und Wellenlängenabhängigkeit der gestreuten Strahlung. Man spricht von Rayleigh-Streuung. Für die zugehörige

spektrale Volumsstreufunktion gilt:

$$\beta_{\theta}(\lambda) = \text{prop.} \left( \frac{1}{\lambda^4} (1 + \cos^2 \theta) \right). \quad (2.7-11)$$

Die Richtungsabhängigkeit ist in Bild 2.7-2 skizziert. Die Wellenlängenabhängigkeit bedeutet, daß kurzwellige Strahlung von 400 nm Wellenlänge (Violett) bedeutend stärker gestreut wird als langwellige Strahlung von 700 nm Wellenlänge (Rot): Die Streuintensitäten unterscheiden sich um einen Faktor  $(700/400)^4 = 9.4$ . Diese bevorzugte Streuung kurzer Wellenlängen ist der Grund für das Blau des Himmels, für das Abendrot und für das Alpenglühen.

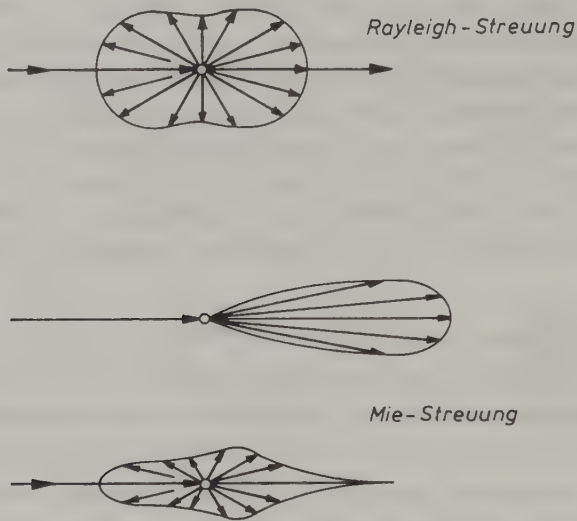


Bild 2.7-2: Volumsstreufunktion bei Rayleigh-Streuung und bei Mie-Streuung

Rayleigh-Streuung findet vor allem an den Molekülen der permanenten Gase der Atmosphäre statt, ist in dieser Form also immer gegeben und stellt jenes Minimum an Streuung dar, mit dem wir auf jeden Fall rechnen müssen. Die horizontale Sichtweite bei reiner Molekül-Streuung liegt bei 340 km.

Entspricht die Teilchengröße ungefähr der Wellenlänge der Strahlung, so ist ein anderer Streumechanismus wirksam, da nun nicht mehr alle Ladungen eines Teilchens in Phase angeregt werden. Es kommt zur Mie-Streuung, die durch stark anisotrope Streufunktionen verschiedener Form (Bild 2.7-2) mit einer

Wellenlängenabhängigkeit gemäß

$$\beta_{\theta}(\lambda) = \text{prop. } \lambda^{-a}, \quad 0 \leq a \leq 4 \quad (2.7-12)$$

gekennzeichnet ist.

Der Exponent der Wellenlängenabhängigkeit kann je nach Teilchengröße zwischen 0 und 4 liegen. Mie-Streuung tritt an Aerosolen auf und kann je nach Atmosphärenzustand sehr unterschiedlich sein.

An Teilchen, die groß im Vergleich zur Wellenlänge sind, tritt nicht selektive Streuung auf. Die Streufunktion ist unabhängig von der Wellenlänge:

$$\beta_{\theta}(\lambda) = \text{prop. } \lambda^0. \quad (2.7-13)$$

Nichtselektive Streuung findet in Nebel und Wolken statt.

In der Praxis kommt es zu einer kombinierten Wirkung aller Streumechanismen. Der Exponent der Wellenlängenabhängigkeit liegt für die reale Atmosphäre meist zwischen 0.7 und 2.0. (Siehe Bild 2.7-3).

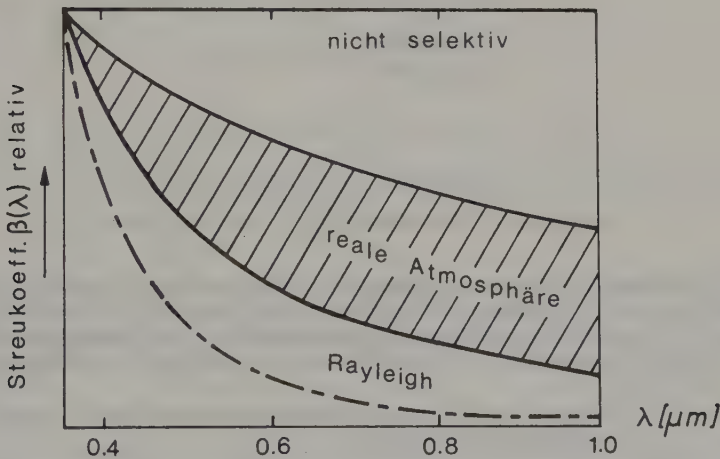


Bild 2.7-3: Spektraler Streukoeffizient der Atmosphäre (Slater, 1980)

Betrachten wir nun die Gesamtsituation bei einer Fernerkundungsaufnahme im Bereich reflektierter optischer Strahlung (Bild 2.7-4): Die von der Sonne

ausgehende Strahlung wird in der Atmosphäre teilweise absorbiert und teilweise gestreut. Nur der restliche Anteil erreicht die Geländeoberfläche als direkte Sonnenstrahlung. Die gestreute Strahlung pflanzt sich teilweise nach unten fort und bestrahlt als Himmelsstrahlung die Geländeoberfläche. Direkte Sonnenstrahlung und Himmelsstrahlung werden zusammen Globalstrahlung genannt. Strahlung wird aber auch nach oben in Richtung zum Sensor gestreut, überlagert sich als Luftlicht der von der Geländeoberfläche reflektierten Strahlung und verringert den Kontrast der Fernerkundungsbilder.

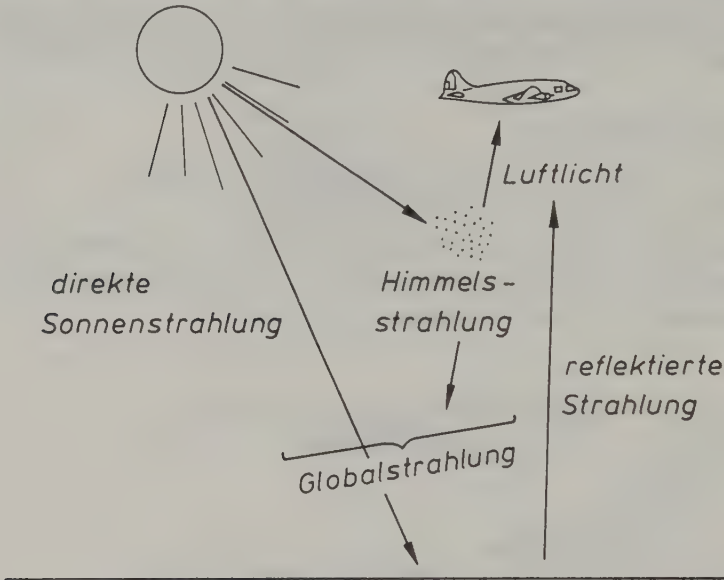


Bild 2.7-4: Strahlungspfade in der Atmosphäre

Beispiel: Aufnahme eines photographischen Luftbildes unter Berücksichtigung der Atmosphäre. Es wird das im Abschnitt 2.3 begonnene und im Bild 2.3-6 skizzierte Beispiel fortgesetzt. Wir übernehmen die dort verwendeten Symbole und Angaben und führen zur Beschreibung des Atmosphäreneinflusses folgende Größen ein:

$\tau_A(h, \theta=0)$   $\hat{=}$  Transmissionsgrad der Atmosphäre vom Boden bis zur Höhe  $h$  bei lotrechtem Strahlungspfad.

$\tau_A(h=\infty, \theta=0)$   $\hat{=}$  Wie  $\tau_A(h, \theta=0)$ , allerdings für die gesamte Atmosphäre.

$\tau_A(h, \theta)$   $\hat{=}$  Transmissionsgrad der Atmosphäre vom Boden bis zur Höhe  $h$  bei schrägem Strahlungspfad ( $\theta$   $\hat{=}$  Zenitwinkel des Strahlungspfades).

$E_{GS}$   $\hat{=}$  Bestrahlungsstärke der horizontalen Geländeoberfläche durch direkte Sonnenstrahlung.

$E_{GH}$   $\hat{=}$  Bestrahlungsstärke der horizontalen Geländeoberfläche durch Himmelsstrahlung.

$L_L(h, \theta, \phi)$   $\hat{=}$  Strahldichte des Luftlichtes in der Höhe  $h$  in Richtung des Zenitwinkels  $\theta$  und des Azimutwinkels  $\phi$  nach oben.

Gegeben: Zenitwinkel der Sonne  $\theta_S = 30^\circ$ ,  
 $\tau_A(h=\infty, \theta=0) = 70\%$ ,  $\tau_A(h=2000m, \theta=0) = 82\%$ .  
 $E_{GH} = 80 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $L_L(h=2000m, \theta=0, \phi) = 6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1}$ ,  
 gerichteter Reflexionsgrad des Ackers  $\rho_r = 10\%$ .

Gesucht: Bestrahlungsstärke  $E_B$  in der Bildmitte.

Lösung: Wir müssen uns zunächst überlegen, wie der Transmissionsgrad  $\tau_A(h, \theta)$  der Atmosphäre für schrägen Strahlungspfad vom Winkel  $\theta$  abhängt. Gemäß (2.7-8) und (2.7-9) gilt:

$$\tau_A(h, \theta) = \frac{\tau(x)}{\tau(0)} = e^{-\int_0^x \beta_{\text{ext}}(x) dx}$$

Die Wegstrecke  $dx$  ist für einen Strahlungspfad, der den Winkel  $\theta$  zur Lotrechten ( $=$  Zenitwinkel) einschließt:  $dx = dh/\cos\theta$ , also folgt:

$$\tau_A(h, \theta) = e^{-\int_0^h \beta_{\text{ext}}(h) \frac{dh}{\cos\theta}} = e^{-\int_0^h \beta_{\text{ext}}(h) dh \frac{1}{\cos\theta}} = (\tau_A(h, \theta=0)) \frac{1}{\cos\theta} \quad (2.7-14)$$

Angewandt entlang des Strahlungspfades Sonne-Acker:

$$\tau_A(h=\infty, \theta_S=30^\circ) = (\tau_A(h=\infty, \theta=0))^{1.155} = 0.70^{1.155} = 0.662 \hat{=} 66.2\%$$

$$(2.3-12): E_{GS} = \frac{I_S \cos\theta}{r_S^2} \tau_A(h=\infty, \theta_S=30^\circ) = 480 \cdot 0.662 = 318 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$E_G = E_{GS} + E_{GH} = 318 + 80 = 398 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$M_G = \rho_r \cdot E_G = 39.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Der weitere Rechengang erfolgt nun analog zum Beispiel des Abschnittes 2.3; es ist jedoch zu beachten, daß der Fluß reflektierter Strahlung mit dem Faktor  $\tau_A(h=2000m, \theta=0) = 0.82$  geschwächt wird. Man erhält deshalb für die Bestrahlungsstärke des Films durch reflektierte Strahlung von der Geländeoberfläche:

$$E_{B, \text{refl}} = 0.82 \cdot 0.384 \cdot 39.8 / 48.0 = 0.261 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Zusätzlich verursacht das Luftlicht eine Bestrahlungsstärke  $E_{B, L}$  gemäß folgender Überlegung: Auf das Flächenelement  $dF_B$  in der Filmebene fällt der Strahlungsfluß:



$$d\dot{q}_L = L_L (h=2000m, \theta=0, \phi) F_L \frac{dF_B}{f^2} = L_L (h=2000m, \theta=0, \phi) \frac{d^2 \cdot \pi}{4 \cdot f^2} dF_B$$

$$E_{B,L} = \frac{d\dot{q}_L}{dF_B} = \frac{d^2 \cdot \pi}{4 \cdot f^2} L_L (h=2000m, \theta=0, \phi) = 0.150 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Die gesamte Bestrahlungsstärke in der Filmmitte ist:

$$E_B = E_{B,refl} + E_{B,L} = 0.261 + 0.150 = 0.411 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Man sieht, daß mehr als ein Drittel dieser Bestrahlungsstärke durch Luftlicht verursacht wird !

Die Beziehung zwischen gerichtetem Reflexionsgrad der Geländeoberfläche  $\rho_r$  und Bestrahlungsstärke  $E_B$  in der Bildebene (Mitte des Bildes) lautet - in Fortsetzung der Beziehung (2.3-13) - in allgemeiner Form:

$$E_B = \frac{d^2}{4f^2} \left( E_G \cdot \rho_r \cdot \tau_A(h, \theta=0) + \pi \cdot L_L(h, \theta=0, \phi) \right) \quad (2.7-15)$$

mit

$$E_G = E_{GS} + E_{GH} \quad (2.7-16)$$

und

$$E_{GS} = \frac{I_S}{r^2} \cos \theta_S \cdot \left( \tau_A(h=\infty, \theta=0) \right) \frac{1}{\cos \theta_S} \quad (2.7-17)$$

Die in diesen Gleichungen verwendeten Symbole sind im obigen Beispiel erläutert.

Fortsetzung des Zahlenbeispiels: Durchrechnung mit spektralen Strahlungsgrößen und für besonnte und beschattete Oberflächen.

Gegeben:

$$I_{S,\lambda=0.55\mu m} = 4.43 \cdot 10^{25} \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1} \mu m^{-1}, \quad I_{S,\lambda=0.80\mu m} = 2.25 \cdot 10^{25} \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1} \mu m^{-1}$$

$$\rho_{Acker}(\lambda=0.55\mu m) = 15\%, \quad \rho_{Acker}(\lambda=0.80\mu m) = 25\%$$

$$\rho_{Wasser}(\lambda=0.55\mu m) = 5\%, \quad \rho_{Wasser}(\lambda=0.80\mu m) = 0.1\%$$

$$\rho_{Nadelwald}(\lambda=0.55\mu m) = 4\%, \quad \rho_{Nadelwald}(\lambda=0.80\mu m) = 30\%$$

$$E_{GH,\lambda=0.55\mu m} = 250 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \mu m^{-1}, \quad E_{GH,\lambda=0.80\mu m} = 95 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \mu m^{-1}$$

$$\tau_A(h=\infty, \theta=0, \lambda=0.55\mu m) = 72\%, \quad \tau_A(h=\infty, \theta=0, \lambda=0.80\mu m) = 87\%$$

$$\tau_A(h=2000m, \theta=0, \lambda=0.55\mu m) = 83\%, \quad \tau_A(h=2000m, \theta=0, \lambda=0.80\mu m) = 92\%$$

$$L_L, \lambda=0.55\mu m (h=2000m, \theta=0, \phi) = 20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \mu m^{-1} \text{sr}^{-1},$$

$$L_L, \lambda=0.80\mu m (h=2000m, \theta=0, \phi) = 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \mu m^{-1} \text{sr}^{-1}$$

Gesucht: Spektrale Bestrahlungsstärke  $E_{B,\lambda}$  in der Bildmitte für die drei Oberflächen Acker, Wasser und Nadelwald bei  $\lambda = 0.55 \mu m$  und  $\lambda = 0.80 \mu m$ , jeweils besonnt und beschattet sowie mit und ohne Berücksichtigung des Luftlichts.

Lösung: Durch Einsetzen in die Gleichungen (2.7-15), (2.7-16) und (2.7-17) erhält man für  $E_{B,\lambda} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \mu m^{-1}]$ :

		Acker		Wasser		Nadelwald	
		Sonne Schatten		Sonne Schatten		Sonne Schatten	
ohne Luftlicht	$\lambda=0.55\mu\text{m}$	1.412	0.248	0.471	0.083	0.377	0.066
	$\lambda=0.80\mu\text{m}$	1.533	0.174	0.006	0.001	1.840	0.209
mit Luftlicht	$\lambda=0.55\mu\text{m}$	1.913	0.749	0.972	0.584	0.878	0.567
	$\lambda=0.80\mu\text{m}$	1.784	0.425	0.257	0.251	2.091	0.459

Tab. 2.7-5: *Spektrale Bestrahlungsstärke in der Bildmitte*  
 $[W \cdot m^{-2} \mu m^{-1}]$

Die Ergebnisse der Tab. 2.7-5 zeigt in Verbindung mit Gleichung (2.7-15) zeigen die kontrastmindernde Wirkung des Luftlichts: Dieses erhöht die Bestrahlungsstärke in der Bildebene unabhängig vom Bildinhalt um einen konstanten Wert. Es verursacht einen "Schleier" über dem Bild. Der Kontrast  $E_{B,\lambda,\max}/E_{B,\lambda,\min}$  der in der Bildebene auftreffenden Bestrahlungsstärken zweier Geländeoberflächen verringert sich durch das Luftlicht umso mehr, je kleiner der Reflexionsgrad der Oberfläche und - bei gleichem Reflexionsgrad - je kurzwelliger die Strahlung ist. Als praktische Konsequenz dieser Erkenntnis werden wir in den Kapiteln 3.1.1.5, 3.1.1.6 und 4.1.1.1 den Einsatz verschiedener Filmtypen für Luftaufnahmen kennenlernen und in Kapitel 3.5 Verfahren diskutieren, welche die Erkennung eines für die Gewinnung kontrastreicher Fernerkundungsbilder günstigen Atmosphärenzustandes (geringe Streuung) erlauben.

Wir wollen nun nochmals genauer auf die Gleichungen (2.7-15) bis (2.7-17) eingehen und dabei alle Größen als spektrale Größen anschreiben. Außerdem führen wir die Bestrahlungsstärke  $E_{GH,\lambda}$  der horizontalen Geländeoberfläche durch Himmelsstrahlung auf die Strahldichtevertelung  $L_{H,\lambda}(\theta, \phi)$  der Himmelsstrahlung zurück:

$$E_{GH,\lambda} = \int_{\text{Halbraum}}^{(2.7-7)} L_{H,\lambda}(\theta, \phi) \cos \theta \cdot d\Omega \quad (2.7-18)$$

Es ist zu beachten, daß in (2.7-15) der für die konkreten Einstrahlungsverhältnisse (Sonnenhöhe, Strahldichtevertelung der Himmelsstrahlung) geltende gerichtete Reflexionsgrad  $\rho_r$  einzusetzen ist !

Eine elegantere Formulierung von (2.7-15) mit einer von den Einstrahlungsverhältnissen unabhängigen Charakterisierung der Gelände-Reflexionseigenschaften lautet unter Verwendung der Reflexionsfunktion:

$$E_B = \frac{\pi \cdot d_L^2}{4f^2} \left[ \underbrace{\left( E_{GS,\lambda} \cdot f(\theta_S, \phi_S; \theta_r=0, \phi_r; \lambda) + \right)}_{(2.5-13): E_{GS,\lambda} \cdot \rho_r(\lambda) / \pi} + \right. \\ \left. + \underbrace{\int_{\text{Halbraum}} L_{H,\lambda}(\theta, \phi) \cdot f(\theta, \phi; \theta_r=0, \phi_r; \lambda) \cos \theta \cdot d\Omega}_{(2.5-7): L_{r,H,\lambda}(\theta_r=0, \phi_r)} \tau_A(h, \theta=0, \lambda) + L_{L,\lambda}(h, \theta=0, \phi) \right] \quad (2.7-19)$$

Der Term  $L_{r,H,\lambda}$  stellt hier die von der Geländeoberfläche senkrecht nach oben reflektierte Himmelsstrahlung dar.

Bei praktischer Verwendung von (2.7-19) ergeben sich Probleme dadurch, daß die Größen  $L_{H,\lambda}(\theta, \phi)$ ,  $L_{L,\lambda}(h, \theta, \phi)$  sowie  $\tau_A(h, \theta, \lambda)$  in komplizierter Weise vom Zustand der Atmosphäre (Aerosolgehalt) sowie zum Teil von der Sonnenhöhe, der Richtung  $\theta, \phi$ , der Wellenlänge  $\lambda$  sowie von der Höhe  $h$  abhängen. Eine Darstellung der entsprechenden Funktionen in geschlossener Form ist nicht möglich. Man kann diese Größen jedoch durch Computersimulation - unter Verwendung sogenannter "Atmosphärenmodelle" - näherungsweise ermitteln. Der Zustand der Atmosphäre wird auf diese Weise durch bestimmte Parameter (in einem sehr einfachen Fall z.B. durch die horizontale Sichtweite (Gleichung (2.7-10)) charakterisiert. Die Größen  $L_{H,\lambda}(\theta, \phi)$  und  $L_{L,\lambda}(h, \theta, \phi)$  werden zusätzlich durch die (spektralen) Reflexionseigenschaften der Geländeoberflächen beeinflusst, da neben der Sonnenstrahlung auch von der Geländeoberfläche reflektierte Strahlung in der Atmosphäre gestreut wird und zur Himmelsstrahlung sowie zum Luftlicht beiträgt. Zur Berücksichtigung dieses Effektes wurden "gekoppelte Oberflächen-Atmosphärenmodelle" entwickelt.

Die Bilder 2.7-6 bis 2.7-8 illustrieren einige Strahlungsgrößen, die mit Hilfe von Atmosphärenmodellen berechnet wurden.

Weiterführende Literatur: Slater (1980, Turner et al. (1971), Chaline (1983), Kneizys et al. (1983).

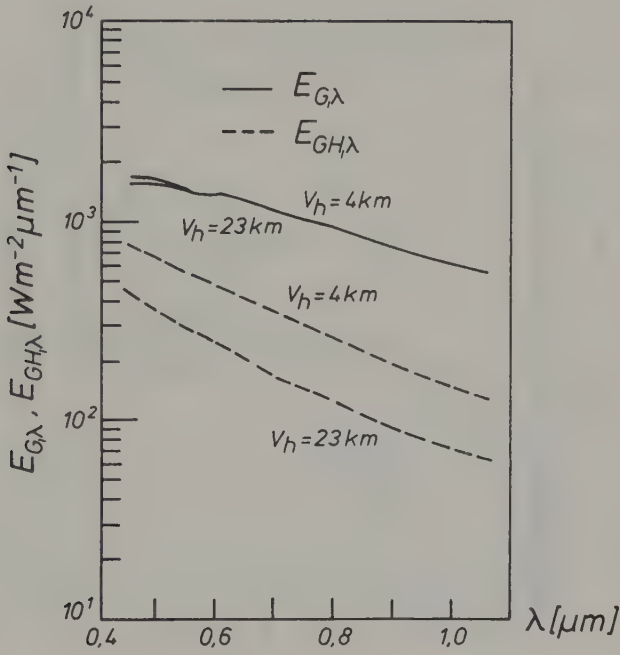


Bild 2.7-6: Spektrale Bestrahlungsstärke einer horizontalen Fläche durch Globalstrahlung ( $E_{G,\lambda}$ ) und durch Himmelsstrahlung ( $E_{GH,\lambda}$ ) für zwei Atmosphärenzustände, charakterisiert durch die horizontalen Sichtweiten  $V_h = 4 \text{ km}$  und  $V_h = 23 \text{ km}$ . Zenitwinkel der Sonne  $\theta_S = 30^\circ$ , Höhe 1000 m, grüne Vegetation. Nach Turner et al. (1971).

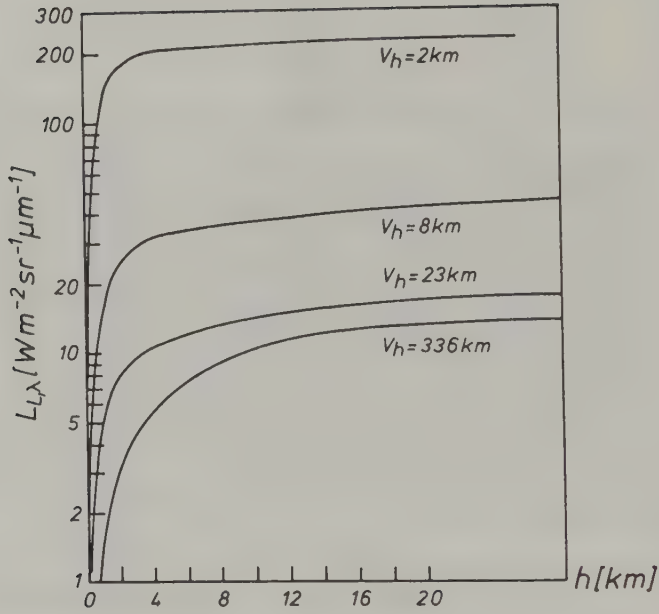


Bild 2.7-7: Höhenabhängigkeit der spektralen Strahldichte des Luftlichts für vier Atmosphärenzustände, charakterisiert durch die horizontalen Sichtweiten  $V_h = 2 \text{ km}$ ,  $V_h = 8 \text{ km}$ ,  $V_h = 23 \text{ km}$  und  $V_h = 336 \text{ km}$  (reine Rayleigh-Streuung). Zenitwinkel der Sonne  $\theta_S = 0^\circ$ , Strahlrichtung des Luftlichts  $\theta = 0^\circ$ , Wellenlänge  $\lambda = 0.55 \mu\text{m}$ , Reflexionsgrad der Geländeoberfläche  $\rho = 0$ . Nach Turner et al. (1971).



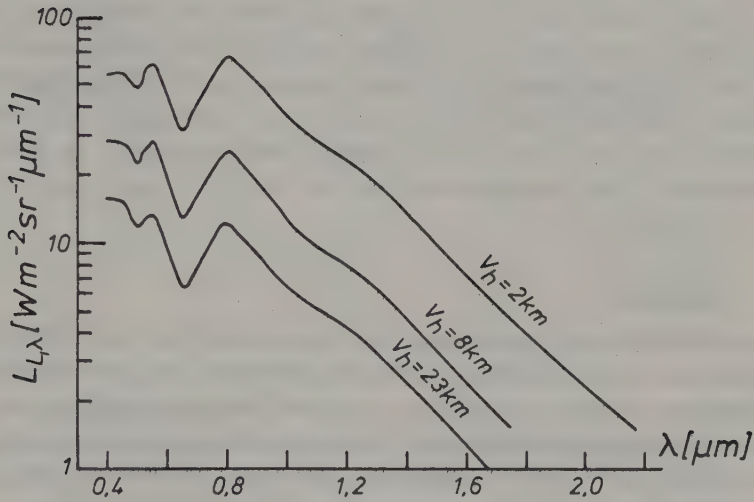


Bild 2.7-8: Spektrale Strahldichte des Luftlichts für drei Atmosphärenzustände, charakterisiert durch die horizontalen Sichtweiten  $V_h = 2 \text{ km}$ ,  $V_h = 8 \text{ km}$  und  $V_h = 23 \text{ km}$ . Zenitwinkel der Sonne  $\theta_S = 45^\circ$ , Strahlrichtung des Luftlichts  $\theta = 0^\circ$ , Höhe  $h = 1000 \text{ m}$ , grüne Vegetation. Nach Turner et al. (1971).

### 3. AUFNAHMESYSTEME (SENSOREN)

Die Aufnahmesysteme der Fernerkundung liefern objektive Informationen über die Umwelt. Um den Wert dieser Informationen abschätzen zu können, muß man über die Funktionsweise dieser Aufnahmesysteme Bescheid wissen.

#### 3.1 Photographische Systeme

Die Photographie mit dem Flugzeug als Plattform ist das am längsten im praktischen Einsatz befindliche Aufnahmesystem. Es wurde vor allem für die Aufgaben der Photogrammetrie entwickelt, hat aber auch beachtliche Anwendung in der Photointerpretation gefunden. Heute ist die photographische Kamera immer noch der am meisten verwendete Sensor, wenn mit Flugzeugen Fernerkundung betrieben wird. Das Kapitel über die photographischen Systeme unterteilen wir im folgenden in ein Kapitel über Meßkameras, in dem auch Amateurkameras kurz angesprochen werden, und in ein Kapitel über Multispektralkameras.

##### 3.1.1 Meßkameras

Der Begriff "Meßkamera" ist aus der Problemstellung heraus entstanden, die Form und Lage von Objekten (auf der Erdoberfläche) aus photographischen Luftaufnahmen zu rekonstruieren. Die "messende" Komponente bezieht sich also auf die Ermittlung geometrischer Parameter. Wir werden später (3.1.1.3) zeigen, daß eine Meßkamera in gewisser Hinsicht auch ein radiometrisches Meßinstrument ist.

##### 3.1.1.1 Gerätetechnisches und Operationelles

Die Meßkamera liefert photographische Bilder ( $\hat{=}$  Meßbilder), die eine exakte Zentralprojektion des aufgenommenen Geländes sind (Bild 3.1.-1). Das räumliche Strahlenbündel, das das photographische Bild erzeugt, enthält sehr viele geometrische Informationen. Für die Rekonstruktion der Geometrie der aufgenommenen Objekte ist es daher entscheidend, aus dem (zweidimensionalen) Bild das (räumliche) Strahlenbündel wieder zu bekommen. Zu diesem Zweck benötigt man die Positionierung des Projektionszentrums O in bezug zum Bild. Diese Positionierung ist wie folgt festgelegt (Bild 3.1.-1):

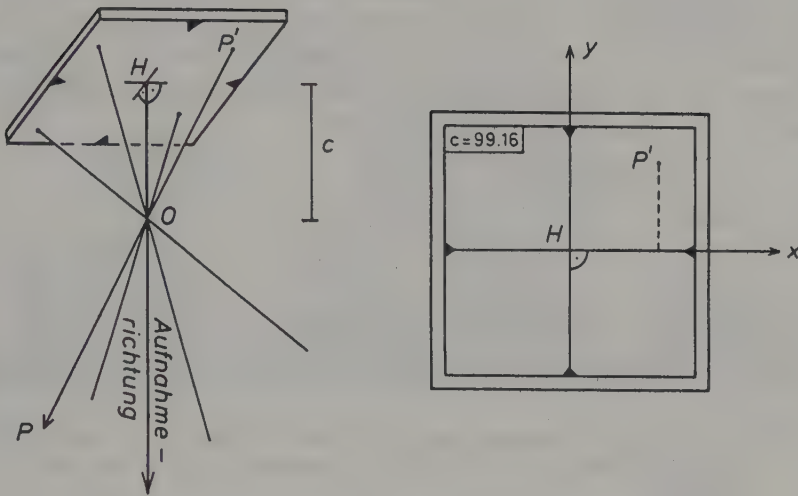


Bild 3.1-1: Meßbild und das zu ihm gehörende Strahlenbündel

- Man verbindet die gegenüberliegenden Rahmenmarken, die auf dem Bild aufbelichtet sind. Der Schnittpunkt der Verbindungslinien ist der sogenannte Bildhauptpunkt H. Er ist der Durchstoßpunkt der durch das Projektionszentrum O gehenden Normalen zur Bildebene ( $\hat{=}$  Aufnahmerichtung).
- Im Abstand c befindet sich das Projektionszentrum O vor dem Bild. Der Abstand c wird als Kammerkonstante bezeichnet.

Die Kammerkonstante c und der Bildhauptpunkt H sind die Elemente der inneren Orientierung. Sie werden vom Hersteller der Meßkamera mit einer Toleranz  $< 10 \mu\text{m}$  bestimmt. Bei bekannter innerer Orientierung ergibt die Messung der Bildkoordinaten x und y der Bildpunkte P' das Strahlenbündel zu den Objektpunkten P. Mit Hilfe dieses Strahlenbündels rekonstruiert man - mit verschiedenen photogrammetrischen Methoden - die Geometrie der photographierten Objekte.

An dieser Stelle kann der wesentliche Unterschied zwischen einer Meßkamera und einer Nichtmeßkamera ( $\hat{=}$  Amateurkamera) angesprochen werden: Zu einem photographischen Bild einer Amateurkamera kann das Projektionszentrum O nicht angegeben werden; bei einer Amateurkamera sind also die Elemente der inneren Orientierung unbekannt.

Interessant ist noch die Frage, inwieweit bei einer Meßkamera tatsächlich das mathematische Modell einer Zentralprojektion eingehalten werden kann. Die Abweichungen gegenüber der Zentralprojektion nennt man Objektivverzeichnung bzw. nur Verzeichnung. Bei modernen Meßkameras ist die Verzeichnung  $\Delta r < 5 \mu\text{m}$ . Bild 3.1-2 zeigt ein Beispiel.

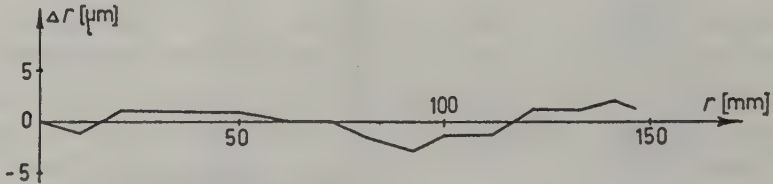


Bild 3.1-2: Radiale Verzeichnung  $\Delta r$  des WILD-Objektives 21 NAg II für weißes Licht ( $r$  = Radius, beginnend im Bildmittelpunkt)

Die Verzeichnung von Amateurkameras kann ebenfalls gering sein; in der Regel wird die Verzeichnung der Amateurkameras aber nur so klein gehalten, daß gerade Objektlinien (z.B. Gebäudekanten) in den Bildern bei freibügiger Betrachtung nicht gekrümmt erscheinen.

Eine Meßkamera ist ein kompliziertes optisches, mechanisches und elektronisches Gebilde. Die Bilder 3.1-3 und 3.1-4 zeigen eine typische Meßkamera der Firma Zeiss, BRD.

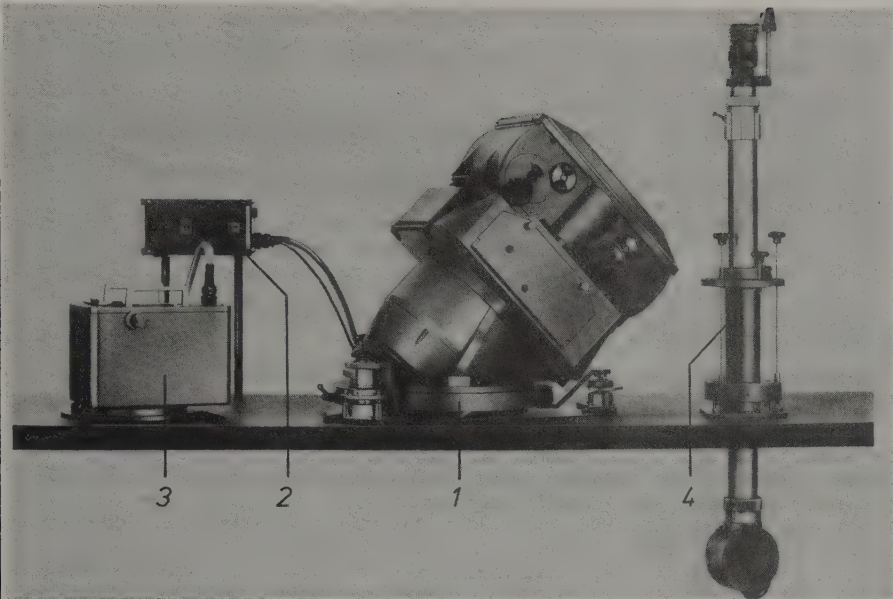


Bild 3.1-3: Reihenmeßkamera RMK A 15/23 (1: Meßkamera, 2: Steuerrechner, 3: Überdeckungsregler, 4: Navigationsteleskop)

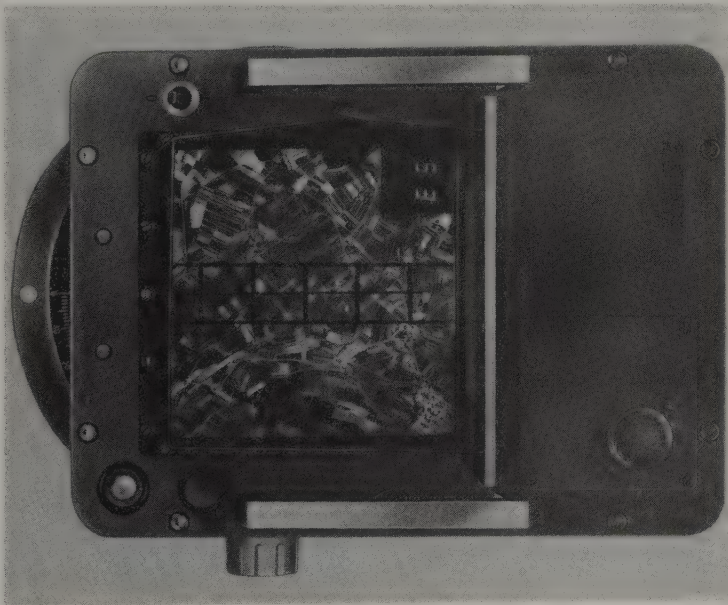


Bild 3.1-4: Überdeckungsregler zur RMK A 15/23



Dazu einige operationelle und technische Daten:

Reihenmeßkamera RMK A 15/23

A: Farbkorrektur der Optik sowohl für das sichtbare Licht als auch im nahen Infrarot.

15/23: Kammerkonstante mit etwa 15 cm, Format 23x23 cm<sup>2</sup>, das bedeutet einen Öffnungswinkel von etwa 100 gon (Weitwinkel).

RMK: Reihenmeßkamera mit einer Filmkassette von ca. 150 m Film; der Film wird durch eine Vakuumeinrichtung an den Anlegerahmen gepreßt; die kürzeste Aufnahmezeit beträgt 1.6 bis 2.0 s; die kürzeste Belichtungszeit 1/1000 s; die größte Blende 1:4. (Die kurze Belichtungszeit und die große Blende sind erforderlich, da bei Luftaufnahmen während der Belichtung die Kamera in Bewegung ist.)

Überdeckungsregler mit Steuerrechner

Der Operateur muß nur die Sprossenkette synchron mit dem wandernden Gelände auf der Mattscheibe halten, indem er kontinuierlich auskantet und mit dem Drehknopf (im Bild 3.1-4 rechts) die Geschwindigkeit der Sprossenkette verändert. (Seit kurzem erfolgen diese Steuerungen sogar automatisch auf elektrooptischer Grundlage.) Der Steuerrechner sorgt dann dafür, daß die Meßkamera auskantet wird und die Bilder mit einer vorgewählten Überdeckung (ca. 20% bei einfacher Deckung, ca. 60% bei Stereodeckung, siehe Kapitel 4.1.1.1 über Flugplanung) aufgenommen werden. In dieser Einheit befindet sich auch die automatische Belichtungsmessung: Bei vorgewählter Blende reguliert der Steuerrechner die Belichtungszeit. Dabei überwacht der Steuerrechner auch die Bewegungsunschärfe und vergrößert notfalls selbsttätig die eingestellte Blende.

Auf einem Meßbild werden in Form von Hilfsabbildungen viele zusätzliche Informationen festgehalten. Bild 3.1-5 zeigt eine wünschenswerte Ausstattung.

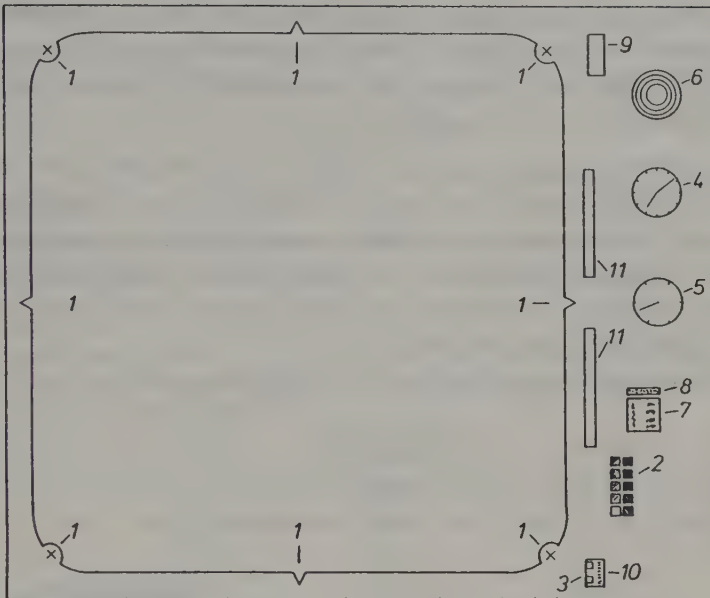


Bild 3.1-5: Hilfsabbildungen auf einem Meßbild

- 1 8 Rahmenmarken
- 2 Graukeil oder Farbkeil zur Überwachung der Bildqualität und der photographischen Folgearbeiten
- 3 Bildnummer, die sich von Aufnahme zu Aufnahme automatisch erhöht
- 4 Uhr zur Dokumentation der Aufnahmezeit (Sonnenstand !)
- 5 Grobhöhenmesser mit einer Genauigkeit von etwa  $\pm 50$  m
- 6 Dosenlibelle zur Überwachung der Horizontierung des Flugzeuges. (Auf die Libelle wirken allerdings auch die Fliehkräfte.) Erfahrungswerte für die erreichbare Horizontierung  $< 5$  gon.
- 7 Schreibtäfelchen für Datum und Projekt
- 8 Kameranummer
- 9 Kassettensnummer
- 10 Kammerkonstante (z.B. 152.642 mm)
- 11 Daten über Aufnahmeort und Bildneigung (nur im Zusammenhang mit teuren Trägheits-Navigationssystemen)

Die Lage der Aufnahmeorte bzw. der Projektionszentren O (Bild 3.1-2) und die Stellung der Bilder in Bezug zur Erdoberfläche sind nach einem Bildflug - sofern keine teuren Navigationssysteme eingesetzt werden - nur näherungsweise bekannt. In der Regel werden diese sogenannten äußeren Orientierungselemente bei einer photogrammetrischen Auswertung aus Paßpunkten bestimmt, worauf im Abschnitt 5.4.1 eingegangen wird.

Bei Interpretationsaufgaben verzichtet man in vielen Fällen auf die Ermittlung der äußeren Orientierungselemente. Die Kenntnis des Bildmaßstabes ist aber für die Abschätzung der Detailerkennbarkeit (geometrisches Auflösungsvermögen) unbedingt erforderlich. Von einem exakten Bildmaßstab kann man, wie Bild 3.1-6 veranschaulicht, allerdings nur dann sprechen, wenn

- das Gelände eine Ebene ist und
- die Aufnahmerichtung orthogonal zur Geländeebene steht.

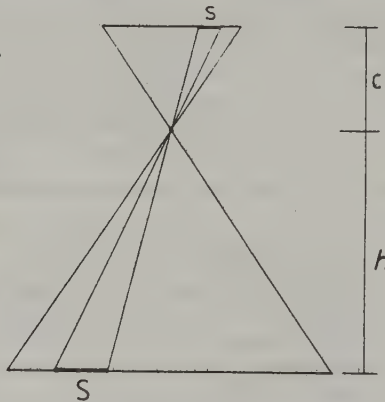


Bild 3.1-6: Definition des Bildmaßstabes  $M_b$  und der Bildmaßstabszahl  $m_b$

$$\frac{\text{Bildstrecke } s}{\text{Objektstr. } S} = \frac{c}{h} = \text{const} = M_b = \frac{1}{m_b} \quad (3.1-1)$$

Der Bildmaßstab wird entweder aus der Angabe des Grobhöhenmessers (Vorsicht: seine Angabe bezieht sich auf Meeresniveau) oder aus einer Vergleichsstrecke mit einer Karte berechnet. (Im Abschnitt 5.1.1 wird das Thema nochmals aufgegriffen.) Von einem großen Bildmaßstab spricht man, wenn die Flughöhe gering bzw. die Bildmaßstabszahl  $m_b$  klein ist; von einem kleinen Bildmaßstab spricht man, wenn die Flughöhe groß ist.

Die drei wichtigsten Hersteller von Meßkameras sind:

- Jenoptik Jena (DDR) bietet das Luftbildkamerasystem LMK an, das einen Graukeil mitabbildet. Seit 1983 gibt es eine Bewegungskompensation (3.1.1.2.5). Der Satz von Objektiven hat die Kammerkonstanten 89, 152, 210 und 305 mm. Die Bestrahlungs- bzw. Belichtungsmessung erfolgt differentiell, d.h. daß entlang der Flugachse eine Serie von Messungen ausgeführt wird und die Belichtungszeiten so bestimmt werden, daß der gesamte Umfang der Bestrahlungsstärke auf dem Bild durch unterschiedliche Schwärzung bzw. Färbung wiedergegeben wird.
- Die Luftbildkameras der Firma Wild (Schweiz) heißen AVIOPHOT RC 10, RC 10a und RC 20. Die RC 20 (seit 1987) hat eine Bewegungskompensation (3.1.1.2.5). Die Kammerkonstanten der Objektive betragen 88, 152, 210 und 303 mm. Die Belichtungsmessung erfolgt integral, d.h. für das gesamte Bildformat wird eine repräsentative Bestrahlungsstärke festgestellt und auf die Mitte der Empfindlichkeit des Filmes abgestimmt.
- Zeiss (BRD) stellt die Reihenmeßkameras RMK (Bild 3.1-3) mit Kammerkonstanten von 85, 153, 210, 305 und 610 mm her. Seit 1984 gibt es eine Bewegungskompensation (3.1.1.2.5). Die Belichtungsmessung geschieht integral. Die Überdeckungsregelung und die Auskantung der Kamera kann vollautomatisch mit optischen Sensoren ermittelt werden.

Wegen der hochentwickelten Technik der Meßkameras und ihres großen Bildformates verwendet man sie auch für Aufgabenstellungen, bei denen nicht die Geometrie sondern die Interpretation des Bildinhaltes im Vordergrund steht.

#### 3.1.1.2 Abbildungsschärfe

Ein wichtiges Qualitätsmerkmal einer Meßkamera ist die Abbildungsschärfe. Sie setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen.

##### 3.1.1.2.1 Tiefenschärfe

Das strahlenoptische Grundgesetz für eine scharfe Abbildung lautet bekanntlich

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} . \quad (3.1-2)$$

Demnach wäre für jede Gegenstandsweite  $g$  eine individuelle Bildweite  $b$  erforderlich. Bei Luft- und Satellitenaufnahmen ist die Gegenstandsweite  $g$  im Verhältnis zur Bildweite  $b$  und zur Brennweite  $f$  sehr groß, sodaß folgende Beziehungen gelten:  $1/g \approx 0$ ,  $b \approx f$ . Eine Meßkamera für Luft- und Satellitenaufnahmen muß deshalb nicht individuell fokussiert werden. (Das etwaige Umfokussieren hätte für die photogrammetrische Auswertung den großen Nachteil, daß sich dadurch die Kammerkonstante verändern würde.) Die Kammerkonstante  $c$  entspricht bei Meßkameras für Luft- und Satellitenaufnahmen ungefähr der Brennweite  $f$ .

Bei den Meßkameras, die auf eine Gegenstandsweite von etwa einem Kilometer fix fokussiert sind, treten also, abhängig von den Höhen- bzw. Tiefenunterschieden des Geländes, Unschärfen in der Bildebene auf. Anstelle einer punktförmigen Abbildung entsteht ein Zerstreuungskreis. Sein Durchmesser besitzt bei Luft- und Weltraumaufnahmen nur wenige Mikrometer. Die von der Tiefenausdehnung des Objektes herrührende Unschärfe nennt man Tiefenschärfe. (Weitere Details siehe Abschnitt A 3.3.1.)

Aufgabe 3.1-1: Man berechne für die RMK 21/23 (3.1.1.1) die ideale Bildweite  $b$  einmal für die Flughöhe von 3000 m und zum anderen für eine Flughöhe von 4000 m.

#### 3.1.1.2.2 Linsenfehler

Darunter fallen sphärische und chromatische Aberration, Astigmatismus und Koma. Diese Linsenfehler betragen bei Meßkameras auch nur einige Mikrometer. Sie können im Prinzip durch starkes Abblenden, d.h. durch Abhalten der optischen Randstrahlung, verringert werden.

#### 3.1.1.2.3 Beugungsunschärfe

Zufolge des Wellencharakters der elektromagnetischen Strahlung und deren Beugung an einer kreisförmigen Blende gibt es statt eines Bildpunktes ein Beugungsscheibchen mit einem Durchmesser  $u$  von (A 3.3.2):

$$u = 2.44 \cdot k \cdot \lambda \quad (3.1-3)$$

$k$ : Blendenzahl, die sich aus dem Verhältnis von Brennweite  $f$  und Blendendurchmesser  $d$  ergibt.

Für eine Wellenlänge von  $1.1 \mu\text{m}$  (nahes Infrarot) und einer Blendenzahl von 8 hat also das Beugungsscheibchen einen Durchmesser von  $u = 2.44 \cdot 8 \cdot 1.1 = 21 \mu\text{m}$ . Beugungsunschärfe und Linsenfehler wirken hinsichtlich der Blendenöffnung gegenläufig. In der Praxis ist deshalb ein Kompromiß erforderlich. (Siehe A 3.3.3).

Aufgabe 3.1-2: Wie groß ist der Durchmesser des Beugungsscheibchens bei einer Blende 1:11 für rotes Licht ?

#### 3.1.1.2.4 Geometrisches Auflösungsvermögen

Eine Quantifizierung der Schärfe einer optischen Abbildung mit einer Meßkamera ist das sogenannten geometrische Auflösungsvermögen, das auch als räumliches Auflösungsvermögen bezeichnet wird. (Eine umfassendere Angabe ist die Kontrastübertragung, die im Abschnitt A 3.3.4 behandelt wurde und im Abschnitt 3.2.1.2 für einen anderen Sensor, den Abtaster, näher erläu-



tert wird; siehe auch Albertz/Kreiling, 1980.) Das geometrische Auflösungsvermögen bringt zum Ausdruck, wie schmal dunkle Striche und ihre gleichgroßen hellen Zwischenräume sein dürfen, damit man sie im Abbild gerade noch erkennt.

Das Auflösungsvermögen, das in Linienpaaren pro mm (lp/mm) angegeben wird, ist von vielen Faktoren abhängig, u.a. von der Blendenzahl, der Lage im Abbild (gegen den Rand verschlechtert sich das Auflösungsvermögen) und vor allem vom Kontrast des abgebildeten Objektes. Für eine moderne Meßkamera beträgt - bei sehr gutem Kontrast - das geometrische Auflösungsvermögen (Meier, 1984):

$$\text{Auflösungsvermögen (AV)} = 150 \text{ lp/mm} \quad (3.1-4)$$

Spezielle Aufklärungskameras haben ein noch größeres geometrisches Auflösungsvermögen.

Zahlenbeispiel: Ein Luftbild wurde in einer Höhe von 1500 m mit einer RMK 15/23 (3.1.1.1) aufgenommen. Welche Details mit sehr hohem Kontrast können aufgrund des Auflösungsvermögens der Kamera noch erkannt werden ?

Größe eines Hell/Dunkel-Strichpaares im Abbild =  $1/150 = 0.007 \text{ mm}$

Größe des hellen oder dunklen Striches (Vernachlässigung der Überstrahlung) =  $0.007/2 = 0.0035 \text{ mm}$

Größe eines noch erkennbaren Details im Gelände mit Gleichung (3.1-1)  
=  $0.0035 \cdot h/c = 0.0035 \cdot 1500/0.15 = 35 \text{ mm}$

Aufgabe 3.1-3: Man wiederhole das Zahlenbeispiel unter der Annahme, daß das Auflösungsvermögen 75 lp/mm (schlechterer Objektkontrast) und die Flughöhe 4000 m betragen.

#### 3.1.1.2.5 Bewegungsunschärfe

Die Bewegungsunschärfe wird durch die Bildwanderung während der Belichtungszeit durch die Fortbewegung des Flugzeuges bzw. Satelliten verursacht. Die Bildwanderung  $w$  durch die Fortbewegung der Plattform kann aus dem Bild 3.1-7 abgelesen werden:

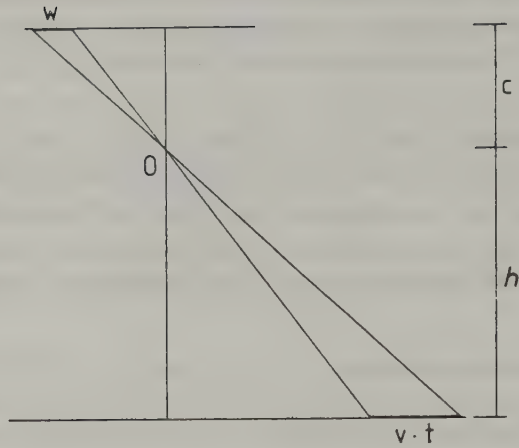


Bild 3.1-7: Bildwanderung ( $v$  = Geschwindigkeit der Plattform,  $t$  = Belichtungszeit)

$$w = v \cdot t \cdot \frac{c}{h} \quad (3.1-1) \quad \frac{v}{m_b} \cdot t \quad (3.1-5a)^1$$

$$w = \frac{10^3 \cdot v \cdot t}{3.6 \cdot m_b} \quad \begin{matrix} w \text{ [mm]} \\ v \text{ [km/h]} \\ t \text{ [s]} \end{matrix} \quad (3.1-5b)$$

Zahlenbeispiel: Ein Flugzeug fliegt mit 300 km/h in einer Höhe von 1500 m. Die Belichtungszeit  $t$  beträgt 1/250 s. Bei einer Kammerkonstanten  $c = 150$  mm beträgt laut Gleichung (3.1-1) der Bildmaßstab:

- 1 Die die Bildwanderung  $w$  beschreibende (Kontrast-)Übertragungsfunktion  $H(f_k, w)$  lautet in Anlehnung an die Beziehung (3.2-13) (siehe auch Bähr, 1985):

$$H(f_k, w) = \frac{\sin(\pi \cdot f_k \cdot w)}{\pi \cdot f_k \cdot w} \quad (3.1-5c)$$

wobei  $l_k = 1/f_k$  die Breite (Wellenlänge) eines Hell/Dunkel-Strichpaares ist.

Weiterhin ist zu beachten, daß wegen der begrenzten Filmempfindlichkeit die tatsächliche Bildwanderung nur etwa halb so groß ist (siehe A 3.3.5).

$$1:m_b = \frac{0.15}{1500} = \frac{1}{10000}$$

$$(3.1-5b): \quad w = \frac{10^3 \cdot 300}{3.6 \cdot 10000 \cdot 250} = 0.033 \text{ mm} \hat{=} 33 \mu\text{m}$$

Das geometrische Auflösungsvermögen (lp/mm), das durch die (Bewegungs-)Unschärfe verursacht wird, folgt aus der Beziehung:

$$\text{Auflösungsvermögen (AV)} = \frac{1}{w} \quad \frac{\text{AV} \left[ \frac{\text{lp}}{\text{mm}} \right]}{w \left[ \frac{\text{mm}}{\text{mm}} \right]} \quad (3.1-6)$$

Fortsetzung des Zahlenbeispiels:

$$\text{AV} = \frac{1}{0.033} = 30 \text{ lp/mm}$$

Das Auflösungsvermögen der Meßkamera  $\text{AV}_k$  (3.1-4) und der Bildwanderung  $\text{AV}_w$  (3.1-6) setzen sich wie folgt zusammen (Meier, 1984):

$$\frac{1}{\text{AV}_{\text{ges}}^2} = \frac{1}{\text{AV}_k^2} + \frac{1}{\text{AV}_w^2} \quad (3.1-7)$$

Fortsetzung des Zahlenbeispiels:

$$\frac{1}{\text{AV}_{\text{ges}}^2} = \frac{1}{150^2} + \frac{1}{30^2} \quad \rightarrow \quad \text{AV}_{\text{ges}} = 29 \text{ lp/mm}$$

Dieses für die Praxis typische Zahlenbeispiel bringt zum Ausdruck, daß das Auflösungsvermögen in den großen Bildmaßstäben, d.h. bei niedrigen Flughöhen, vor allem durch die Bewegungsunschärfe geprägt ist.

Fortsetzung des Zahlenbeispiels des Abschnittes 3.1.1.2.4: Man hat dort eine Detaillierkennbarkeit von 35 mm auf der Erdoberfläche erhalten, wenn man nur die Meßkamera in Betracht zieht. Durch die Einbeziehung einer Bildwanderung  $w$  von 33  $\mu\text{m}$  beträgt das Auflösungsvermögen nur noch 29 lp/mm:

Größe eines Hell/Dunkel-Strichpaares im Abbild =  $1/29 = 0.034 \text{ mm}$

Größe eines hellen oder dunklen Striches (Vernachlässigung der Überstrahlung) =  $0.034/2 = 0.017 \text{ mm}$

Größe eines noch erkennbaren Details im Gelände mit Gleichung (3.1-1) =  $0.017 \cdot 1500/0.15 = 170 \text{ mm}$

Die von allen Firmen (3.1.1.1) inzwischen verwirklichte Bewegungskompensation (FMC = forward motion compensation) ist deshalb von großer praktischer Bedeutung. Bei diesen Kameras wird während der Belichtungszeit  $t$  der Film mit der Geschwindigkeit  $v' = v/m_b$  (3.1-5a), wobei  $v$  die Plattformgeschwindigkeit ist, gegen die Flugrichtung bewegt. Dadurch wird die Bewegungsun-

schärfe, die von einer gleichmäßigen Fluggeschwindigkeit herrührt, kompensiert. Nicht kompensiert wird die Bewegungsunschärfe zufolge (A 3.3.5):

- einer Rotation der Plattform,
- der Abweichungen der Fluggeschwindigkeit von einer gleichmäßigen Fortbewegung,
- der Geländehöhenunterschiede bzw. der unterschiedlichen Aufnahmeentfernungen ( $m_b$  ist in diesem Fall ja nicht konstant).

Aufgabe 3.1-4: Wie groß ist die Bildwanderung  $w$  einer photographischen Satellitenaufnahme mit der RMK 30/23 (3.1.1.1) in 250 km Flughöhe ? Die Geschwindigkeit der Plattform betrage 27000 km/h, die Belichtungszeit  $t = 1/500$  s. Wie groß ist das durch die Bildwanderung verursachte Auflösungsvermögen in Linienpaaren/mm [lp/mm] im Bild ? Wie groß ist das Auflösungsvermögen [lp/mm] im Zusammenspiel zwischen der Optik, die ein Auflösungsvermögen von 120 lp/mm besitzen soll, und der Bildwanderung ? Wie groß sind die auf der Erdoberfläche gerade noch erkennbaren Details ?

#### 3.1.1.3 Die Kamera als Strahlungsmesser

Bisher wurde das von einer Meßkamera erzeugte Bild hinsichtlich seiner Geometrie und seiner Schärfe charakterisiert. In diesem Abschnitt fragen wir uns, wie die elektromagnetische Strahlung das Bild in der Bildebene aufbaut.

Zuerst ist zu klären, welcher Bereich der elektromagnetischen Strahlung mit einer photographischen Kamera überhaupt erfaßt werden kann. Die limitierenden Schranken sind dabei die Empfindlichkeit des Filmes, worauf im Abschnitt 3.1.1.4 eingegangen wird, und das Objektiv. Optisches Glas auf Silikatbasis, aus dem Objektive normalerweise gefertigt werden, ist nur für elektromagnetische Strahlung mit Wellenlängen zwischen 0.25 und 3  $\mu\text{m}$  transparent, d.h. nur für das ultraviolette und das sichtbare Licht sowie für die nahe und die mittlere Infrarotstrahlung (Bild 2.2-2). Im Bild 3.1-8 ist der spektrale Transmissionsgrad  $\tau(\lambda)$  für optisches Glas angegeben und zusätzlich für Germanium, mit dem immerhin für sehr dünne optische Bauelemente auch im thermischen Infrarot eine gewisse Transparenz gegeben ist. Im folgenden können wir uns - da wir Objektive mit normalem optischen Glas unterstellen - auf die von der Erdoberfläche reflektierte Strahlung beschränken (Bild 2.7-4).

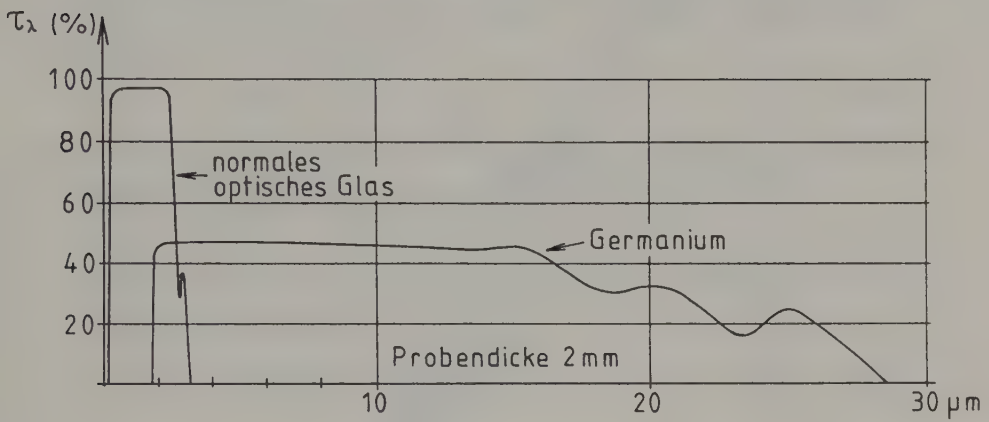


Bild 3.1-8: Spektrale Durchlässigkeit von normalem optischen Glas und Germanium (Stahl, Miosga, 1980)

Das Radiometer "Photographische Kamera" haben wir mit den Gleichungen (2.3-13) (ohne Atmosphäre) bzw. (2.7-15) bis (2.7-17) und (2.7-19) (mit Atmosphäre) bereits beschrieben, allerdings nur für die Bildmitte und völlige Transparenz des Objektivs. Nun erfolgt eine Verallgemeinerung (Bild 3.1-9).





Der auf die Bildebene fallende Strahlungsfluß  $d\dot{\Phi}_B$  ergibt sich aus dem Transmissionsgrad  $\tau_0$  des Objektives und dem auf das Objektiv fallenden Strahlungsfluß  $d\dot{\Phi}_L$ , der aus der Richtung des abgebildeten Oberflächenelementes auf das Objektiv fällt:

$$d\dot{\Phi}_B = \tau_0 \cdot d\dot{\Phi}_L \quad (3.1-10)$$

Der Strahlungsfluß  $d\dot{\Phi}_L$  folgt aus der von der Erdoberfläche abgehenden Strahldichte  $L_G$  (2.3-5):

$$d\dot{\Phi}_L = L_G \cdot \cos \alpha \cdot dF_G \cdot \Omega_L \quad (3.1-11)$$

Der Raumwinkel  $\Omega_L$ , unter dem die Blendenöffnung des Objektives vom Boden aus gesehen wird, lautet (Bild 3.1-9):

$$\Omega_L = \frac{d_L^2 \cdot \pi \cdot \cos \alpha}{4 \cdot l^2} = \frac{d_L^2 \cdot \pi \cdot \cos^3 \alpha}{4 \cdot h^2} \quad (3.1-12)$$

Mit den Gleichungen (3.1-8) bis (3.1-12) erhalten wir für die Bestrahlungsstärke  $E_B$ :

$$E_B = \frac{d_L^2 \cdot \cos^4 \alpha \cdot \tau_0 \cdot \pi \cdot L_G}{4 \cdot f^2} \quad (3.1-13)$$

In Ergänzung zu jenen Erkenntnissen, die im Anschluß an die Gleichung (2.3-13) gezogen wurden, ist zu vermerken:

- Die Bestrahlungsstärke nimmt zum Bildrand mit  $\cos^4 \alpha$  ab. (An einer unter 50 gon platzierten Bildstelle beträgt die Bestrahlungsstärke z.B. nur noch 25% im Vergleich zur Bildmitte). Dies gilt streng genommen nur für die Abbildung mit einer dünnen Linse. Bei mehrlinsigen Objektiven kann durch spezielle optische Konstruktionsprinzipien ein geringerer Abfall der Bestrahlungsstärke (etwa proportional zu  $\cos^{2.5} \alpha$ ) erreicht werden. Für einen weiteren Ausgleich der Bestrahlungsstärke in der Bildebene werden sogenannte Verlaufsfilter mit abfallenden Grauwerten von der Bildmitte zum Bildrand benutzt.
- Mit Vergrößerung der üblichen Blendenzahlen  $k = f/d_L = 4, 5, 6, 8, 11, 16, 22$  halbiert sich jeweils die Bestrahlungsstärke von Stufe zu Stufe.

- Falls die Geländeoberfläche ein Lambertischer Strahler ist, gilt für die Strahldichte  $L_G$  in (3.1-13):

$$\pi \cdot L_G \stackrel{(2.3-10)}{=} M_G \stackrel{(2.5-2)}{=} \rho \cdot E_G \stackrel{(2.3-12)}{=} \rho \frac{I_S \cdot \cos \theta_S}{r_S^2} \quad (3.1-14)$$

$M_G \hat{=}$  Spezifische Ausstrahlung der Geländeoberfläche.

$\rho \hat{=}$  Reflektionsgrad, der von Objektklasse zu Objektklasse variiert.

$E_G \hat{=}$  Bestrahlungsstärke der auf die Geländeoberfläche treffenden Strahlung.

$I_S \hat{=}$  Strahlungsstärke der Sonne.

$r_S \hat{=}$  Entfernung Sonne-Erde.

$\theta_S \hat{=}$  Winkel zwischen den Sonnenstrahlen und der Normale des jeweiligen Flächenelementes, d.h. daß die Bestrahlungsstärken  $E_B$  vom aktuellen Sonnenstand und von der Geländeform abhängen.<sup>1</sup>

Da - wie z.B. im Bild 2.5-4 veranschaulicht - die Geländeoberfläche kein Lambertischer Strahler ist, kann bei genaueren Betrachtungen die Strahldichte  $L_G$  in (3.1-13) nicht mit (3.1-14) substituiert werden. Die Strahldichte  $L_G$  ergibt sich vielmehr mittels der Reflexionsfunktion  $f(\theta_e, \phi_e; \theta_r, \phi_r)$  entsprechend der Gleichung (2.5-7) oder mittels des gerichteten Reflexionsgrades  $\rho_r$  entsprechend der etwas umgestellten Gleichung (2.5-8). Die darin enthaltene Richtungsabhängigkeit der Strahldichte  $L_G$  ist in allen Fernerkundungsbildern sichtbar: Der Bildbereich, der "mit" der Sonne fotografiert ist, erscheint heller als der "gegen" die Sonne aufgenommene Bildbereich.

Pfeiffer (1983) hat das richtungsabhängige Strahlungsverhalten für Strahlung verschiedener Wellenlänge und für verschiedene Objekte (Acker, Winterweizen, Wiese) gemessen. Im Bild 3.1-10 ist auf der Ordinate die Strahldichte  $L$  der reflektierten Strahlung in einem relativen Maß aufgetragen. Auf der Abszisse ist die Aufnahmerichtung (Bildwinkel) angegeben, wobei  $0^\circ$  die Bildmitte und  $-40^\circ$  eine Aufnahmerichtung mit der Sonne und  $+40^\circ$  eine Aufnahmerichtung gegen die Sonne bedeuten. Das hier besprochene richtungsabhängige Strahlungsverhalten darf nicht mit dem seltenen Ereignis eines sogenannten Lichtpunktes (hot spot) verwechselt werden. In der Bildebene

<sup>1</sup> Zunächst vermutet man, daß noch eine zusätzliche Abhängigkeit der Bestrahlungsstärke  $E_B$  von der Geländeform deshalb auftritt, weil bei der Gleichung (3.1-11) der Winkel  $\alpha$  durch den Winkel  $\beta$  zu ersetzen ist. Die Schenkel des Winkels  $\beta$  sind die Normale des jeweiligen (geneigten) Flächenelementes und die Gerade zum Objektivmittelpunkt. Da aber "geneigte Geländestrecken"  $\cdot \cos \beta =$  "horizontale Geländestrecken"  $\cdot \cos \alpha$  ist, gilt die Beziehung (3.1-13) auch für kupiertes Gelände.

entsteht dann ein Lichtpunkt, wenn an einem Element der Erdoberfläche gerichtete Reflexion (Bild 2.5-2 links) auftritt, d.h. Sonne, Kamera und Normale des spiegelnden Oberflächenelementes müssen in einer Ebene liegen und der Einfallswinkel der Sonnenstrahlung muß dem Ausfallswinkel der reflektierten Strahlung zur Kamera entsprechen.

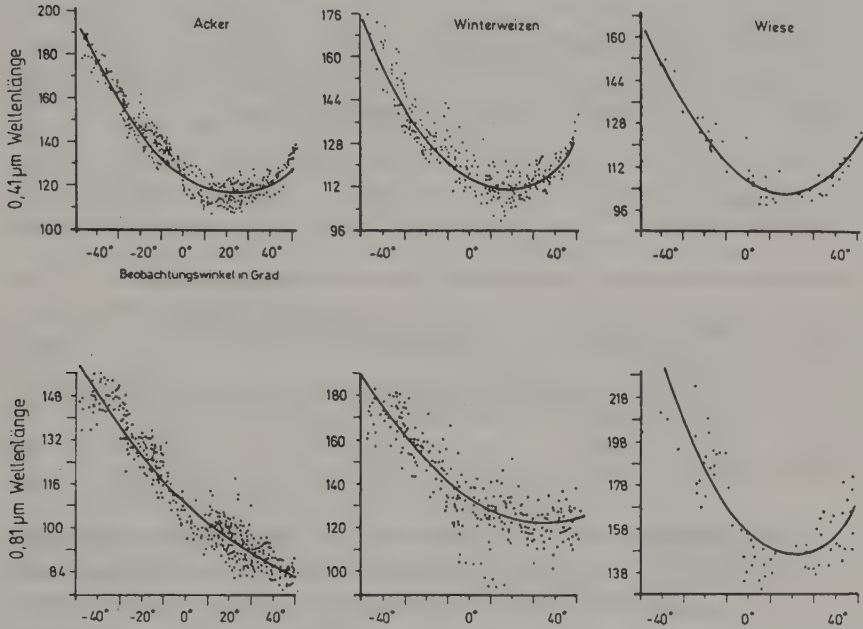


Bild 3.1-10: Strahldichte in Abhängigkeit von der Aufnahmerichtung für zwei verschiedene Wellenlängen und für drei verschiedene Objektklassen

Im Sinne der Benutzung einer photographischen Kamera als Strahlungsmesser ist folgende Aussage erlaubt: Abgesehen von den Systemparametern ( $d_L, f, \alpha, r_0$ ) und den Parametern des Strahlers ( $I_S, r_S, \theta_S$ ), ist die Bestrahlungsstärke  $E_B$  in erster Linie vom gerichteten Reflexionsgrad  $\rho_r$  (2.5-8) abhängig. Eine Photographie registriert sozusagen die gerichteten Reflexionsgrade der Geländeoberflächenelemente, wobei die Richtung der reflektierten Strahlung in der Geraden mit dem Geländepunkt P, dem Projektionszentrum O und dem Bildpunkt P' liegt (Bild 3.1-2).

Die Strahlung, die mit dem Film in der Bildebene der Kamera festgehalten wird, wird noch durch die Wechselwirkung der elektromagnetischen Strahlung mit der Atmosphäre beeinflusst (Bild 2.7-4). Ein Teil der Sonnenstrahlung

wird von der Atmosphäre absorbiert und gestreut. Vom gestreuten Anteil kommt ein Teil (Himmelsstrahlung) ebenfalls zur Erdoberfläche und ein Teil (Luftlicht) geht - ohne mit der Erdoberfläche in Reaktion zu treten - direkt zur Meßkamera.

Für ein Geländeflächelement, das in der Bildmitte abgebildet wird, wurde der Einfluß der Atmosphäre mit den Gleichungen (2.7-14) bis (2.7-17) bereits beschrieben. Ausgehend von diesen Gleichungen und unter Beachtung der Beziehung (3.1-13) bekommt man folgende Kameragleichung:

$$E_B = \frac{d_L^2 \cdot \cos^4 \alpha \cdot \tau_0}{4 \cdot f^2} \left[ \left( E_{GS} + E_{GH} \right) \rho_r \left( \tau_A(h, \theta=0) \right)^{\frac{1}{\cos \alpha}} + \pi \cdot L_L(h, \alpha, \phi) \right] \quad (3.1-15)$$

$E_{GS}$   $\hat{=}$  Bestrahlungsstärke der Geländeoberfläche durch die Sonne  
(2.7-17).

$E_{GH}$   $\hat{=}$  Bestrahlungsstärke der Geländeoberfläche durch die Himmelsstrahlung.

$L_L(h, \alpha, \phi)$   $\hat{=}$  Strahldichte des Luftlichtes in der Höhe h in Richtung der Geraden vom Geländepunkt P über das Projektionszentrum O zum Bildpunkt P', die mit den Winkeln  $\alpha$  und  $\phi$  im Raum festgelegt sein soll. Das Luftlicht kann mit Hilfe von Atmosphärenmodellen abgeschätzt werden. (Siehe Abschnitt 2.7, Bilder 2.7-7 und 2.7-8 sowie auch Abschnitt 6.5.1.)

$\tau_A(h, \theta=0)$   $\hat{=}$  Transmissionsgrad der Atmosphäre von der Geländeoberfläche bis zur Höhe h bei lotrechtem Strahlungspfad. Er hängt vor allem vom Extinktionskoeffizienten  $\beta_{ext}$  ab (Gleichungen (2.7-6) bis (2.7-9) und Abschnitt 3.5.3).

Zahlenbeispiel: Mit den im Abschnitt 2.7 eingeführten Angaben ergibt sich die dort berechnete Bestrahlungsstärke  $E_B$  auch aus der Beziehung (3.1-15), wenn man den Transmissionsgrad des Objektives  $\tau_0 = 1$  und den Winkel  $\alpha = 0$  setzt:

$$E_B(\alpha=0) = \frac{1}{4 \cdot 5.6^2} \left[ (480 \cdot 0.70^{1.155} + 80) 0.1 \cdot 0.82 + \pi \cdot 6 \right] = 0.41 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Falls der Acker unter einem Bildwinkel  $\alpha = 45^\circ$  aufgenommen wird und sonst alle Parameter unverändert bleiben, also auch das Luftlicht  $L_L$  als Lambertscher Strahler angenommen wird, beträgt die Bestrahlungsstärke:



$$E_B(\alpha=45^\circ) = \frac{0.25}{4 \cdot 5.6^2} [(480 \cdot 0.662 + 80) 0.1 \cdot 0.82^{1.414} + \pi \cdot 6] = 0.097 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

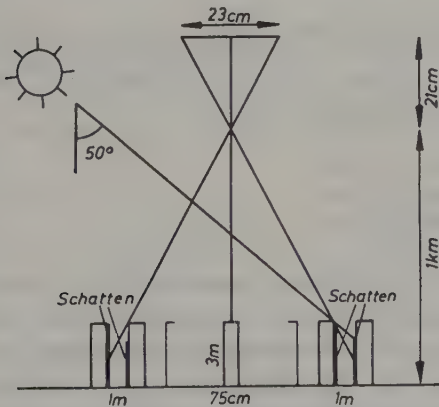
Abschließend kann festgestellt werden, daß mit einer Meßkamera die Reflexionseigenschaften der Geländeoberfläche sowie die Streu- und Absorptionseigenschaften der Atmosphäre festgehalten werden. Eine absolute Deutung des Bildinhaltes erfordert allerdings im Zeitpunkt der Überfliegung u.a. die Erfassung vieler meteorologischer Daten. Da die einschlägige Theorie und die Meßtechnik noch nicht genügend ausgereift sind, begnügt man sich vorwiegend mit einer relativen Deutung des Bildinhaltes, die von verifizierten Bilddetails vor Ort ausgeht und für den gesamten Bildinhalt eine "Interpolation" durchführt (Royer et al., 1985).

Sowohl für die absolute als auch für die relative Deutung des Bildinhaltes liefern die Überlappungsbereiche benachbarter Bilder wichtige Informationen. Die unterschiedliche Ausprägung des Bildinhaltes für ein und dasselbe Geländeoberflächenelement ist nämlich von den hier besprochenen "störenden" Einflüssen verursacht. In der Literatur findet man Ansätze, aus den Diskrepanzen in den Überlappungsbereichen Korrekturen für den gesamten Bildverband zu finden (z.B. Kitzmüller (1983), Kähler, König (1984)).

Aufgabe 3.1-5: Man wiederhole das Zahlenbeispiel mit einem Reflexionsgrad  $\rho = 0.15$  (Lehmboden), einem Sonnenstand  $\theta_s = 45^\circ$ , einem Bildwinkel  $\alpha = 30^\circ$  und mit der Annahme, daß das Gelände 10% zur Sonne hin geneigt ist. Die Lotebene durch die Falllinie des Geländes enthalte die Sonne.

Aufgabe 3.1-6: Auf einer horizontalen Geländeebene gibt es 75 cm breite und 3 m hohe Kulturen. Der Abstand zwischen den Zeilen beträgt 1 m. Man gebe für ein Bildprofil den Verlauf der Strahldichte L an. Für ein Flächenelement, das senkrecht zur Sonnenstrahlung gehalten wird, beträgt die Bestrahlungsstärke durch direkte Sonneneinstrahlung

$E_{GS} = 300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . Für die Himmelsstrahlung beträgt die Bestrahlungsstärke  $E_{GH} = 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . Sowohl am Boden als auch an der Kultur wird Lambertische Strahlungscharakteristik vorausgesetzt. Der Reflexionsgrad der Kultur beträgt 0.2 und der des Bodens 0.1. Mehrfachreflexionen mögen vernachlässigt werden.



Zusatzaufgabe: Wie ändert sich der Verlauf der Strahldichte L, wenn das Gelände 10% zur Sonne hin geneigt ist?

Zusätzliche Literatur: Ranson et al. (1986)), Sievers (1976).

#### 3.1.1.4 Photographische Belange

Das in der Bildebene der Meßkamera mit der Bestrahlungsstärke  $E_B$  aufgebaute Bild wird mit einem photographischen Prozeß aufgezeichnet. Die photographischen Prozesse sprechen auf Wellenlängen des elektromagnetischen Spektrums zwischen 0.3 und 1  $\mu\text{m}$  an. Das mittlere und das thermische Infrarot können also mit keinem photographischen Prozeß direkt festgehalten werden. Bevor auf die unterschiedlichen photographischen Prozesse eingegangen werden kann, ist ein kurzer Abschnitt über Farben und Filter einzuschließen.

##### 3.1.1.4.1 Farben und Filter

Wie im Bild 3.1-11 oben skizziert, kann die Strahlung des sichtbaren Lichtes, die bei konstanter Spektralverteilung im menschlichen Auge den Farbeindruck Weiß hervorruft, in eine hohe Anzahl von monochromatischen Spektrallinien zerlegt werden, die in gesättigten "Spektralfarben" gesehen werden. Unterteilt man das weiße Licht in drei benachbarte Gruppen etwa gleicher Bandbreite von je 100 nm, so entstehen die drei Mischfarben Blau, Grün und Rot. Es sind drei additive Grundfarben. Durch Addition dieser drei Grundfarben (Übereinanderprojizieren der Lichter) können andere Farben gemischt werden. Bei gleichanteiliger Mischung der drei Grundfarben entsteht Weiß.

Die Mischung des Lichtes von je zwei additiven Grundfarben ergibt die subtraktiven Grundfarben Cyan, Gelb und Magenta. Diese erhält man durch Subtraktion einer additiven Grundfarbe vom weißen Mischlicht:

$$\begin{array}{llll} \text{cyan} & = & \text{blau} + \text{grün} & = & \text{weiß} - \text{rot} \\ \text{gelb} & = & \text{grün} + \text{rot} & = & \text{weiß} - \text{blau} \\ \text{magenta} & = & \text{rot} + \text{blau} & = & \text{weiß} - \text{grün} \end{array} \quad (3.1-16)$$

Solche Subtraktionen werden mit Hilfe von Filtern erreicht. Filter absorbieren einen Teil des auf sie auftreffenden Lichtes und lassen den Rest des Lichtes hindurch. Wenn auf das Filter weißes Mischlicht trifft, gibt der transmittierte Teil die Filterfarbe an; der absorbierte Teil, der die Filterfarbe zu Weiß ergänzt, wird als Komplementärfarbe bezeichnet. Wie aus dem Bild 3.1-11 ersichtlicht, sind cyan und rot bzw. gelb und blau bzw.

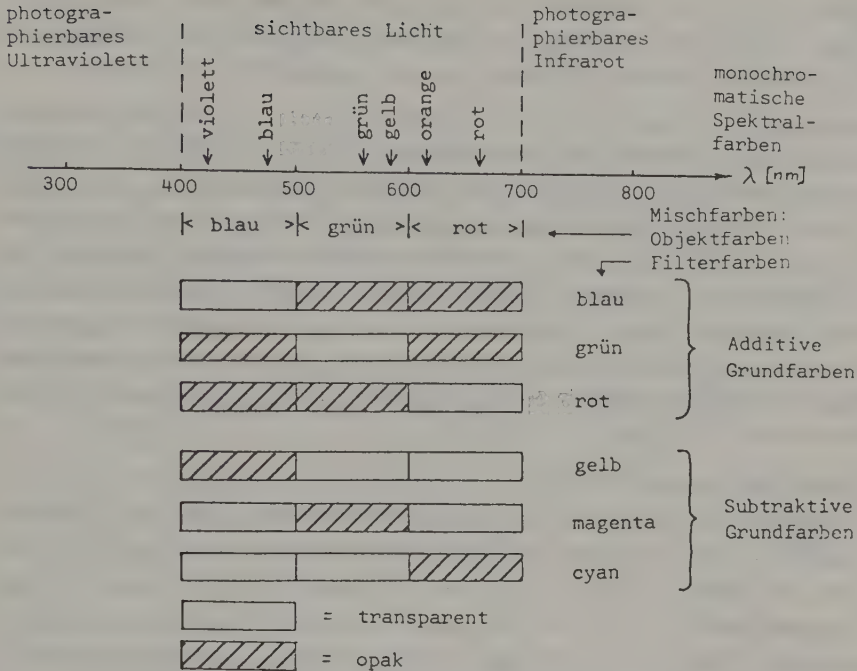


Bild 3.1-11: Elektromagnetisches Spektrum sowie Durchlässigkeits- bzw. Absorptionscharakteristika von Filtern der additiven und subtraktiven Grundfarben

magenta und grün jeweils zwei Komplementärfarben. Zwei Komplementärfarben ergeben übereinanderprojiziert - d.h. additiv gemischt - wieder weiß. Weiß erhält man natürlich auch durch Übereinanderprojizieren der drei additiven (aber auch der subtraktiven!) Grundfarben:

blau + gelb	= weiß	
grün + magenta	= weiß	
rot + cyan	= weiß	
blau + grün + rot	= weiß	(3.1-17)
gelb + magenta + cyan	= weiß	

Die Bezeichnung des Filters erfolgt - wie bereits erwähnt - nach der Farbwahrnehmung des durchgelassenen Anteiles des weißen Lichtes. Hat z.B. ein in das weiße Mischlicht gehaltenes Filter die Farbe grün, wird es als Grünfilter bezeichnet (mittleres Filter bei den additiven Grundfarben des

Bildes 3.1-11). Es läßt die grüne Mischfarbe, die von einem Objekt reflektiert werden kann, passieren und absorbiert die Farben Blau und Rot, d.h. blaue und rote Objekte erscheinen durch ein grünes Filter in Schwarz.

Ein Filter, das eine subtraktiven Grundfarbe passieren läßt und daher deren Namen trägt, absorbiert die komplementäre additive Grundfarbe und läßt die beiden anderen additiven Grundfarben passieren. So sperrt z.B. ein Magentafilter (mittleres Filter bei den subtraktiven Grundfarben des Bildes 3.1-11) die Farbe grün, d.h. grüne Objekte erscheinen durch ein Magentafilter betrachtet in Schwarz. Das Magentafilter läßt aber das blaue und rote Licht passieren. Eine Filterkombination von zwei subtraktiven Grundfarben (z.B. cyan und magenta) läßt vom weißen Licht nur die additive Grundfarbe hindurch, die den beiden Filterfarben gemeinsam ist (in dem genannten Beispiel Blau).

Tatsächlich trennen die Filter die verschiedenen Farben aber oft nicht sehr scharf. Ein Grünfilter kann z.B. bei der Spektralfarbe grün eine Durchlässigkeit von nur 80% und bei der Spektralfarbe rot noch eine Durchlässigkeit von 35% haben (Bild 3.1-12). Die Bestrahlungsstärke,  $E_{n.Fil.}$ , nach Durchgang durch ein Filter, das einen spektralen Transmissionsgrad  $\tau(\lambda)$  haben soll und auf das Strahlung mit der spektralen Bestrahlungsstärke  $E_\lambda$  (2.3-15) trifft, ergibt sich mittels der Beziehung:

$$E_{n.Fil.} = \int_{\lambda = \lambda_1}^{\lambda_2} \tau(\lambda) \cdot E_\lambda \cdot d\lambda \quad (3.1-18)$$

Dabei ist  $\lambda_2 - \lambda_1$  jener Bereich des Spektrums, für den  $\tau(\lambda) \neq 0$  ist.

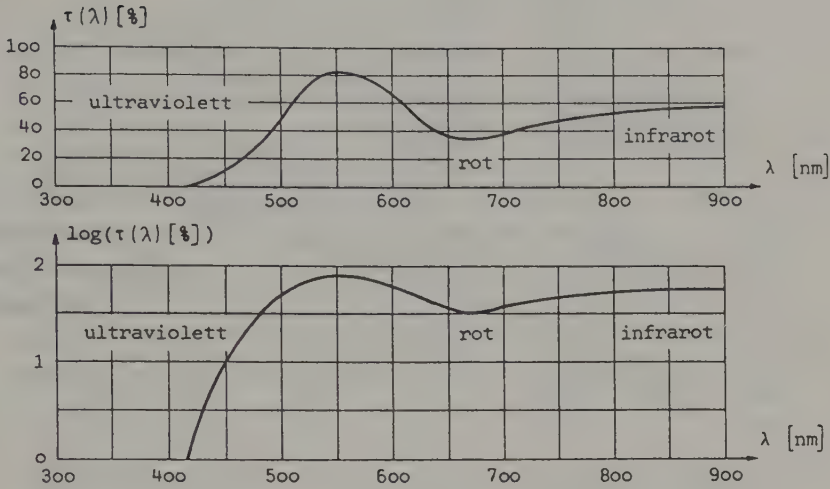


Bild 3.1-12: *Lichtdurchlässigkeit eines Grünfilters*  
oben: *spektraler Transmissionsgrad  $\tau(\lambda)$  in % des einfallenden Lichtes,*  
unten: *ebenso, jedoch in logarithmischer Teilung*

Bei Luft- und Satellitenaufnahmen setzt man meist Filter ein, die eine sehr steile Filterkante haben (Bild 3.1-13). Die Strahlung links von der Filterkante wird gesperrt und die rechts von ihr geht hindurch.



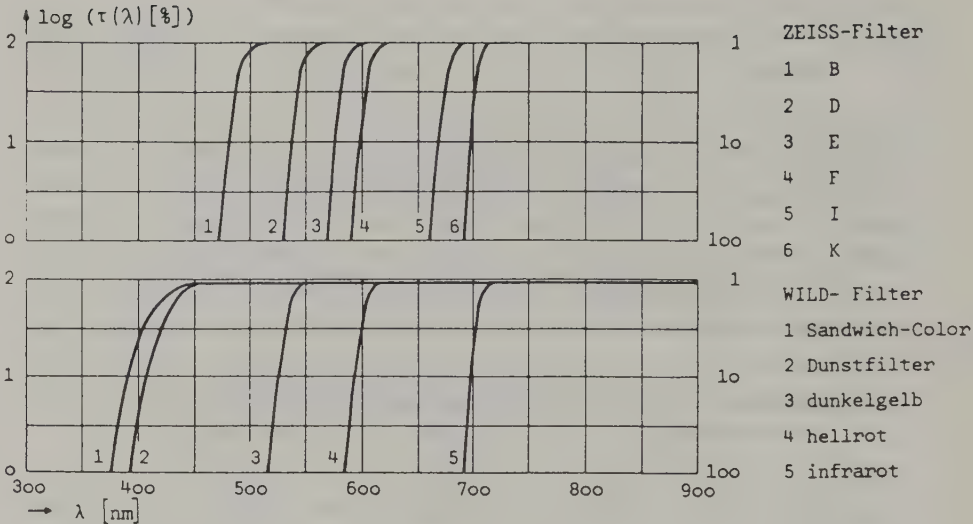


Bild 3.1-13: Transmissions- (bzw. Absorptions-)Kurven von Filtern für Meßkameras

Die Filter mit den kleinen Nummern dienen z.B. für die Abschirmung des unerwünschten blauen Luftlichtes. Das Infrarotfilter absorbiert das sichtbare Licht und läßt nur die Infrarotstrahlung passieren. Es ist deshalb (nahezu) schwarz.

Das Thema Farben wird im Abschnitt 6.1 nochmals aufgegriffen.

Aufgabe 3.1-7: Auf ein Grün-Filter, das vor das Objektiv einer Meßkamera gesteckt wird, fällt Strahlung mit folgenden Bestrahlungsstärken:

$$\begin{aligned} E_{\lambda=0.30} &= 0.25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \\ E_{\lambda=0.45} &= 2.10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \\ E_{\lambda=0.60} &= 4.20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \\ E_{\lambda=0.75} &= 3.50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \\ E_{\lambda=0.90} &= 2.40 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \end{aligned}$$

Man berechne die spezifische Ausstrahlung  $M$  (Spektralbereich zwischen 0.3 und 0.9  $\mu\text{m}$ ) nach dem Verlassen des Grünfilters, dessen spektraler Transmissionsgrad im Bild 3.1-12 gegeben ist. Der Verlauf der spektralen Bestrahlungsstärke  $E_{\lambda}$  kann durch lineare Interpolation aus den gegebenen Stützwerten gebildet werden. Die Beziehung (3.1-18) ist numerisch zu integrieren.

### 3.1.1.4.2 Schwarzweiß-Photographie

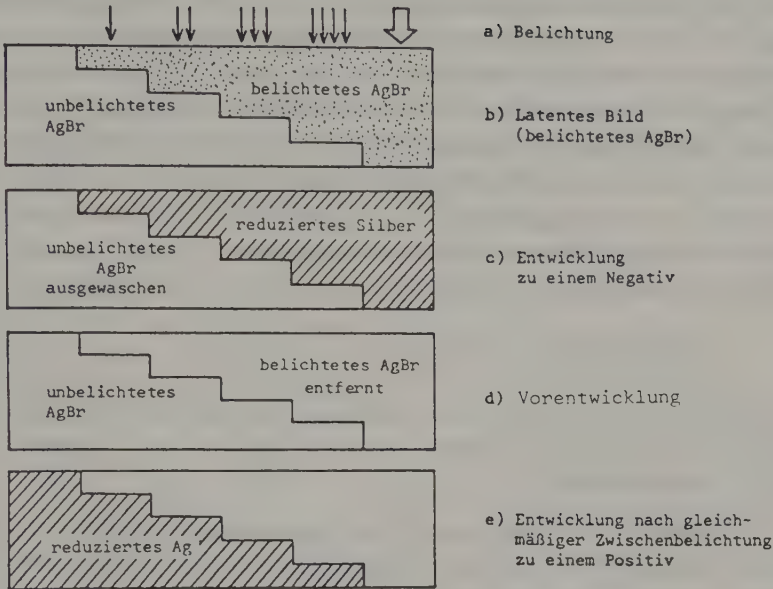


Bild 3.1-14: Schwarzweiß-Negativprozeß (a,b,c) und Schwarzweiß-Umkehrprozeß (a,b,d,e)

Zufolge der Belichtung bzw. Bestrahlung entsteht in der photographischen Schicht, die auf einer maßhaltigen Polyesterschicht aufgebracht ist (Bild A 3.1-11) und in der Silberhalogenide ( $\text{AgBr}$ ,  $\text{AgCl}$ ,  $\text{AgJ}$ , Kristallgröße  $0.2\ \mu\text{m}$ ) in Gelatine eingebettet sind, ein latentes Bild, das bei der Negativentwicklung (etwa mit Hydrochinon, Alkalien und Kaliumbromid) sichtbar wird. Dabei wird das Silber vom Brom getrennt. Das unbelichtete Silberbromid wird im Fixierbad (Natriumthiosulphat = Fixiernatron) in ein leicht wasserlösliches Silbersalz umgewandelt und anschließend im Wasserbad ausgelöst. Nur metallisches Silber bleibt im belichteten Umfang zurück. Beim Umkehrprozeß erfolgt während der Vorentwicklung ( $\hat{=}$  Bleichung) ein Auslösen des belichteten Silberbromids. Das unbelichtete Silberbromid bleibt. Es wird nachbelichtet und dann als Positiv ausentwickelt, fixiert und gewässert. Die Nachbelichtung kann auch durch chemische Behandlung mit Natriumsulfid ersetzt werden (Sofortbildprozeß!).

Die Schwärzung oder Dichte D eines Negatives bzw. Positives mißt man mit Densitometern. Man unterscheidet zwischen Makrodensitometern, die ein Bildelement mit einem Durchmesser von ca. 1 mm untersuchen, und Mikrodensitometern, bei denen sich die gemessenen Dichten auf Bildelemente mit einem Durchmesser von ca. 10  $\mu\text{m}$  beziehen. (Im Abschnitt 6.2 werden Densitometer zur raschen Messung der Dichten aller Bildelemente eines ganzen Bildes vorgestellt.) Bei einem Densitometer wird der ausgesandte Strahlungsfluß  $\Phi_0$  ins Verhältnis zu dem vom Film nicht absorbierten Anteil  $\Phi$  gebracht. Dieses Verhältnis wird mit Transparenz  $\tau = \Phi/\Phi_0$  bezeichnet. Wir haben dafür die Bezeichnung Transmissionsgrad bereits kennengelernt. ( $\tau = 1$  bedeutet also vollkommene Transparenz.) Die Dichte D ergibt sich aus der Beziehung:

$$D = \log \frac{1}{\tau} \quad \text{mit} \quad \tau = \frac{\Phi}{\Phi_0} \quad (3.1-19)$$

Der Dichtewert  $D = 2$  bedeutet also, daß nur 1/100 des auftreffenden Strahlungsflusses den Film durchdringt, bei  $D = 1$  ist es 1/10.  $D = 0$  entspricht totaler Durchlässigkeit.

Für die Dichte D wählt man deshalb eine logarithmische Funktion der reziproken Transparenz  $\tau$  (die auch als Opazität O bezeichnet wird), weil ein Graukeil, dessen Felder sich um  $\Delta \log O = \text{const}$  unterscheiden, vom menschlichen Auge als ein linearer Graukeil empfunden wird (A 3.2.4).

Außerdem wird an die photographische Schicht im Sinne eines Strahlungsmessers die Anforderung gestellt, daß aus der mit einem Densitometer gemessenen Transparenz  $\tau$  auf die Bestrahlung bzw. Belichtung  $H$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}$ ], die ein Produkt aus der auf die photographische Schicht treffenden Bestrahlungsstärke  $E$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ] und der Bestrahlungs- bzw. Belichtungszeit  $t$  [s] ist, geschlossen werden kann. Für diesen Zusammenhang bietet sich folgende Beziehung an:

$$D = \log \frac{1}{\tau} = \gamma \cdot \log(E \cdot t) = \gamma \cdot \log H$$

(3.1-20)

Das bedeutet, daß ein Schwärzungsunterschied  $\Delta D = D_1 - D_2$  im Filmnegativ proportional zum Verhältnis  $H_1/H_2$  der dazugehörigen Bestrahlung  $H$  bzw. der dazugehörigen Bestrahlungsstärke  $E$  ist:

$$\Delta D = \gamma \cdot (\log H_1 - \log H_2) = \gamma \cdot \log(H_1/H_2) = \gamma \cdot \log(E_1/E_2) \quad (3.1-21)$$

Wenn die Schwärzung  $D$  der photographischen Schicht proportional zum dekadischen Logarithmus der Bestrahlung  $H$  zunimmt, ist in einem  $D, \log H$ -Koordinatensystem  $\gamma = \tan \alpha$ , wobei  $\alpha$  der Neigungswinkel der Geraden ist (Bild 3.1-15).  $\gamma$  wird als Gradation bezeichnet. Ist  $\gamma > 1$ , so haben wir es mit einem kontrastreichen ("harten") Film zu tun: Kleine Bestrahlungsunterschiede bewirken große Schwärzungsunterschiede. Bei einem weichen Film sind die Verhältnisse umgekehrt. Die richtige Belichtung harter Filme ist wesentlich schwieriger als die Belichtung weicher Filme.

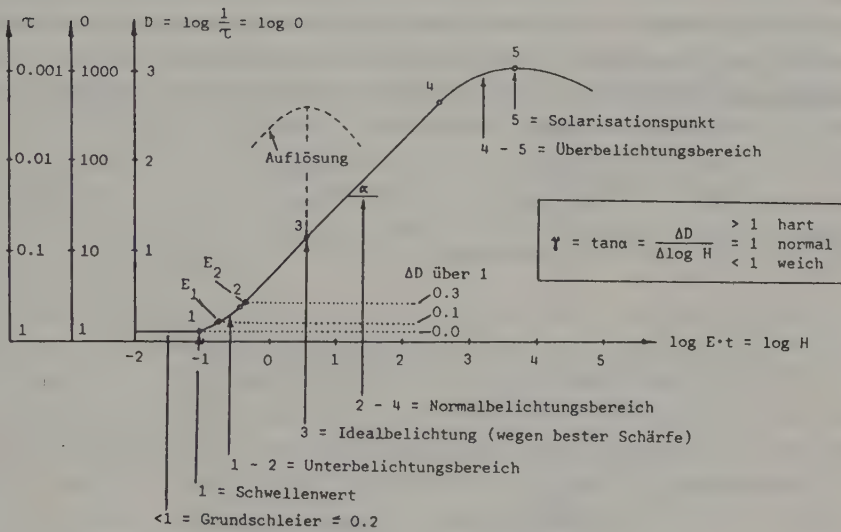


Bild 3.1-15: Die Schwärzungskurve

Die Gradation ist aber nicht nur vom photographischen Material und dessen Alter, sondern auch von den Entwicklungschemikalien sowie von der Entwicklungstemperatur und der Entwicklungsdauer abhängig (Bilder A 3.2-7 bis A 3.2-10). Man kann also z.B. die falsche Wahl des photographischen Materials - zumindest teilweise - noch bei der Entwicklung ausgleichen. Um die Teilprozesse des photographischen Gesamtprozesses überwachen zu können, ist die Aufbelichtung eines Graukeiles auf den noch unbelichteten Film von großer Wichtigkeit.

Bild 3.1-15 zeigt die gesamte Schwärzungskurve. Der Solarisationspunkt ist nach dem photographischen Effekt benannt, demzufolge ein Bild der Sonne in

einem Negativ weniger geschwärzt ist als der sie umgebende Himmel. Die Empfindlichkeit  $S$  (sensitivity, speed) einer photographischen Schicht wird für eine bestimmte Strahlungsquelle und für genau festgelegte Entwicklungsbedingungen als Kehrwert jener Bestrahlung bzw. Belichtung  $H_{\Delta D}$  definiert, mit der eine bestimmte Dichtedifferenz  $\Delta D$  über dem Grundschieier erzielt wird. Die DIN-Zahlen (Deutsches Institut für Normung) sind ein logarithmisches Maß der Empfindlichkeit und beziehen sich dabei auf jene Belichtung  $H_{\Delta D}$ , mit der eine Schwärzung von  $\Delta D = 0.1$  über dem Grundschieier erzielt wird ( $E_1$  im Bild 3.1-15). (Dafür sind die Entwicklungsbedingungen genau definiert.) Die Tabelle 3.1-16 gibt einen Vergleich der DIN-Zahlen mit denen der ASA (American Standards Association). Mit steigender DIN- oder ASA-Zahl nimmt die Empfindlichkeit des Filmes also zu. Der Zusammenhang zwischen den zwei genannten Empfindlichkeitsangaben ist wie folgt:

$$S_{DIN} = 10 \cdot \log \frac{H_0}{H_{\Delta D=0.1}} \quad S_{ASA} = \frac{0.8 \cdot H_0}{H_{\Delta D=0.1}} \quad (3.1-22a)$$

$$H_0 = 1 \text{ lx} \cdot \text{s} \quad (\text{siehe Anhang 2.3-2}) \quad H_{\Delta D} [\text{lx} \cdot \text{s}]$$

DIN	ASA	DIN	ASA
	0.8	16	32
1	1.0	17	40
2	1.2	18	50
3	1.6	19	64
4	2.0	20	80
5	2.5	21	100
6	3	22	125
7	4	23	160
8	5	24	200
9	6	25	250
10	8	26	320
11	10	27	400
12	12	28	500
13	16	29	640
14	20	30	800
15	25	40	8000

Tab. 3.1-16: Vergleich DIN- und ASA-Empfindlichkeitsangaben

In den USA gilt für Luftbildfilme eine eigene Norm, die sich auf eine Einheit von  $3/2$  jener Bestrahlung bezieht, mit welcher bei einer genau festgelegten "mittleren" Entwicklung  $\Delta D = 0.3$  über dem Grundschieier er-



reicht wird ( $E_2$  im Bild 3.1-15, AFS = aerial film speed):

$$\text{AFS} = \frac{2 \cdot H_0}{3 \cdot H_{AD=0.3}} \quad (3.1-22b)$$

Für andere Entwicklungsspezifikationen und für infrarotempfindliche Filme, worauf im Abschnitt 3.1.1.4.4 eingegangen wird, wird die Empfindlichkeit in EAFS (effective AFS) angegeben. Während die AFS die genormte Entwicklung verlangt, ist sie bei EAFS frei, aber natürlich anzugeben (Graham, Read, 1986).

Bei der Aufnahme eines photographischen Bildes ist es wünschenswert, wenn die Unterschiede in der Bestrahlung  $H$ , die von der Variation der Bestrahlungsstärke  $E$  bzw. des Reflexionsgrades  $\rho$  herrühren, im linearen Bereich der Schwärzungskurve liegen. Die Bestrahlungs- bzw. Belichtungsmessung wird deshalb in den Fernerkundungskameras mit großem Konstruktionsaufwand durchgeführt (3.1.1.1). Jene Bildteile, die mit einer Belichtung in der Nähe des Punktes 3 der Schwärzungskurve (Bild 3.1-15) entstehen, haben die beste geometrische Auflösung.

Bei Fernerkundungsaufnahmen aus großen Höhen bewirkt vor allem das Luftlicht eine starke Kontrastminderung (2.7, Tab. 2.7-5, und 3.1.1.3). Es sind deshalb harte Filme ( $\gamma = 1.4 - 2.0$ ) zu verwenden, die - wie schon erwähnt - hinsichtlich der richtigen Belichtung aber sehr hohe Anforderungen stellen. Gute Luft- und Weltraumaufnahmen hängen von vielen Faktoren ab, die man noch nicht alle genau genug im Griff hat. Vor größeren Fernerkundungsprojekten werden deshalb in der Regel Probeaufnahmen belichtet und entwickelt. Außerdem spielt die Erfahrung eine große Rolle.

Am Ende dieses Abschnittes soll noch die Kopierung mit Kontrastausgleich angesprochen werden. Diese elektronischen Kopiergeräte gestatten ein Herabsetzen großflächiger Dichteunterschiede bei gleichzeitigem Erhöhen der Detailkontraste (A 3.2.10). Damit kann vor allem die Richtungsabhängigkeit der Bestrahlungsstärke  $E$  vom Bildwinkel  $\alpha$  weitgehend eliminiert werden.

Aufgabe 3.1-8: In einem Filmnegativ werden mit einem Densitometer an zwei Bildstellen die Transparenz  $\tau_1 = 0.05$  und  $\tau_2 = 0.10$  gemessen. Man berechne das Verhältnis der Bestrahlungsstärken  $E_1/E_2$ , die diese Schwärzungen hervorgerufen haben, wenn ein Film mit einer Gradation  $\gamma = 1.2$  benutzt wurde. (Ergebnis:  $E_1/E_2 = 1.782$ )

Zusatzaufgabe: Wie groß ist die Bestrahlungsstärke  $E_2$ , wenn die Bestrahlungsstärke  $E_1 = 0.891 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  ist? (Ergebnis:  $E_2 = 0.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ )

Aufgabe 3.1-9: Bei Bestimmung der Gradation eines belichteten (Negativ-)Filmes wurden an zwei Bildstellen mit einem Densitometer die Transpa-

renz  $\tau_1 = 0.075$  und  $\tau_2 = 0.120$  gemessen. Zusätzlich sind die Bestrahlungsstärken  $E_1 = 1.1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  und  $E_2 = 0.7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  bekannt, die bei der photographischen Aufnahme an diesen beiden Bildstellen die Schwärzung hervorgerufen haben. Wie groß ist die Gradation des Filmes ? (Ergebnis:  $\gamma = 1.04$ )

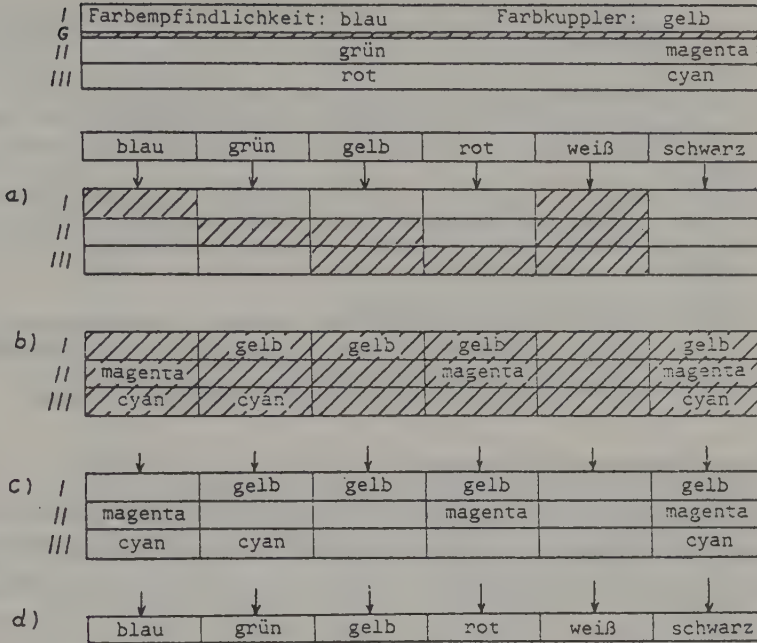
#### 3.1.1.4.3 Farbphotographie

Insbesondere für die Fernerkundung benutzt man anstelle des Schwarzweiß-Filmes, der die Informationen in Grauwerten festhält, gerne Farbfilme, die über die Farbe eine weitere Dimension der Informationsspeicherung erschließen. Der Farbfilm ist aus drei lichtempfindlichen Schichten aufgebaut (Bild 3.1-17).

Zwischen Schicht I und II ist eine Gelbfilterschicht G, die Licht von den auch blauempfindlichen tieferen Schichten fernhält und sich beim Entwickeln auflöst. Jede farbempfindliche Schicht enthält Farbkuppler für die jeweilige Komplementärfarbe. Beim Kodachrome-Prozeß werden die Farbkuppler erst im Farbentwickler zugesetzt. Die Bilder 3.1-17 und 3.1-18 schildern den Aufbau und die Entwicklung des Positivfarbfilmes und des Negativfarbfilmes.

Die Dichte D eines Farbnegatives bzw. Farbpositives wird ebenfalls mit Densitometern gemessen, allerdings getrennt für die drei Grundfarben. (Ein Farbfilm hat - im Sinne der Multispektralphotographie (3.1.2) - drei Spektralbereiche.) Mit dieser Verallgemeinerung können die Ausführungen im vorhergehenden Abschnitt über Dichte, Transparenz und Gradation auch für den Farbfilm angewandt werden.

Sowohl der Positivfarbfilm als auch der Negativfarbfilm spielen in der Fernerkundung nur eine untergeordnete Rolle. Dagegen ist der nun zu besprechende Farbinfrarotfilm der Standardfilm für die Fernerkundung.



**Bild 3.1-17: Der Positivfarbfilm (Farbumkehrprozeß).** Rot, Grün und Blau sind die drei additiven Grundfarben, Gelb wird als Beispiel einer Mischfarbe angeführt. Schraffierte Flächen: reduziertes Silber. G = Gelbfilter

- a) Belichtung und Entwicklung ohne Farbkupplung.
- b) Diffuse weiße Zwischenbelichtung und Entwicklung in Farbentwickler mit Farbkupplung.
- c) Bleichbad und Fixierbad entfernen reduziertes Silber und Bromsilber, die Farbstoffe bleiben.
- d) Betrachtungsfarben in durchfallendem weißen Licht (Subtraktive Farbmischung).

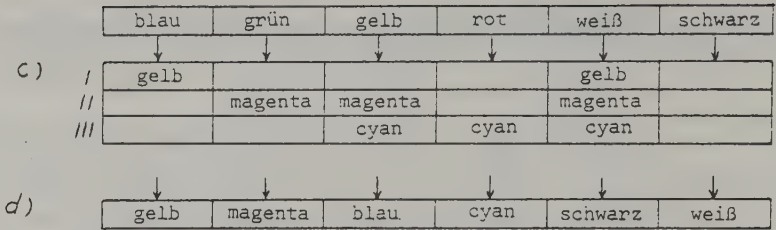


Bild 3.1-18: Der Negativfarbfilm

- c) Belichtung und Entwicklung mit farbkuppelndem Entwickler ergibt nach Bleichbad und Fixierung Komplementärfarben.  
d) Betrachtung in durchfallenden weißen Licht.

#### 3.1.1.4.4 Farbinfrarotphotographie

Dieser Farbfilm besteht ebenfalls aus drei lichtempfindlichen Schichten. In diesem Fall sind die drei Schichten aber für Infrarot, Grün und Rot sensibilisiert, die mit den Farben Cyan, Gelb und Magenta gekoppelt sind (Bild 3.1-19).

Dadurch erscheinen im weißen Durchlicht z.B. grüne Objekte in Blau, rote Objekte in Grün und infrarotstrahlende Objekte in Rot. Da alle drei Schichten auch blauempfindlich sind, wird die Aufnahme mit einem Gelbfilter vor dem Objektiv gemacht. (Eine Gelbfilterzwischenschicht - wie beim normalen Farbfilm (Bild 3.1-17) - ist daher nicht erforderlich.) Durch diese Filterung erscheinen blaue Objekte im Farbinfrarotfilm schwarz. Wegen der Verschiebung der natürlichen Farben - um eine Grundfarbe - wird der Farbinfrarotfilm (color infrared film) auch als Falschfarbenfilm (false color film) bezeichnet. (Nach der Seite A 50 ist ein Farbinfrarotbild abgedruckt.)

Für infrarotempfindliche Filme wird die Empfindlichkeit immer in EAFS angegeben (3.1.1.4.2). Zur Bestimmung der EAFS eines solchen Filmes werden Vergleichsaufnahmen von für die jeweilige Anwendung typischen Szenen mit einem Standard-Schwarzweißfilm bekannter AFS durchgeführt.

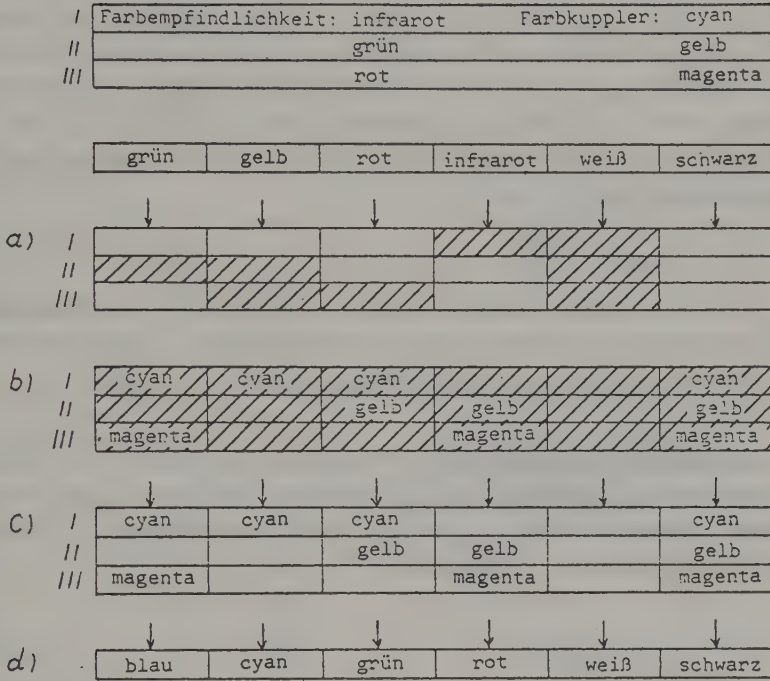


Bild 3.1-19: Der Positiv-Farbinfrarotfilm (Farbumkehrprozeß).  
 Schraffierte Flächen: reduziertes Silber.  
 a) - d) wie bei Bild 3.1-17.  
 Das blaue Licht wird vom Gelbfilter absorbiert.



### 3.1.1.5 Spektrale Empfindlichkeit verschiedener Filmtypen und Zuordnung der entsprechenden Objektinformation

Die Empfindlichkeit  $S$  eines Filmes bzw. einer Filmschicht wurde im Abschnitt 3.1.1.4.2 als der Reziprokwert der Bestrahlung (in der Einheit  $J \cdot m^{-2} = W \cdot s \cdot m^{-2} = 10^3 \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) definiert, die eine bestimmte photographische Dichte erzeugt (z.B.  $\Delta D = 1$  über dem Grundschleier). Die spektrale Empfindlichkeit  $S(\lambda)$  gibt nun die Empfindlichkeit  $S$  als Funktion der Wellenlänge  $\lambda$  an. Die Einheit von  $S(\lambda)$  ist  $W^{-1} \cdot s \cdot m^2$ . Die relative spektrale Empfindlichkeit  $S_{rel}(\lambda)$  ist:

$$S_{rel}(\lambda) = \frac{S(\lambda)}{S_0} \quad (3.1-23a)$$

wobei  $S_0$  eine konstante Empfindlichkeit ist, sodaß  $S_{rel}(\lambda)$  eine dimensionslose Größe wird. Die relative spektrale Empfindlichkeit  $S_{rel}(\lambda)$  verschiedener Filmtypen ist im Bild 3.1-20 zusammengestellt.

Der panchromatische Schwarzweißfilm "integriert" die gesamte, in der Bildebene ankommende Objektstrahlung des sichtbaren Lichtes zu einem Grauwert in jedem Bildpunkt, falls - wie aus Bild 3.1-20 ersichtlich - ein UV-Filter benutzt wird. Bei dieser Integration

$$E = \int_{\lambda=\lambda_1}^{\lambda_2} S_{rel}(\lambda) \cdot E_{\lambda} \cdot d\lambda \quad (3.1-23b)$$

ist die relative spektrale Empfindlichkeit  $S_{rel}(\lambda)$  des Filmes für jede Wellenlänge zu beachten. Da die Schwärzung des Filmes aus einer Integration über den gesamten Bereich des sichtbaren Lichtes entsteht, kann man aus den Grauwerten nicht auf die einzelnen spektralen Anteile des sichtbaren Lichtes schließen. Um eine ausgewogene Verteilung der Grauwerte zu bekommen, sollte die Empfindlichkeit des Schwarzweißfilmes für alle Wellenlängen gleich sein, d.h. die Kennlinie im Bild 3.1-20 sollte im Spektralbereich zwischen 400 und 700 nm eine parallele Gerade zur Abszissenachse sein. Bei den meisten Filmen ist allerdings im Grünbereich eine gewisse Depression vorhanden, sodaß - im Positiv - die Vegetation verhältnismäßig dunkel erscheint.

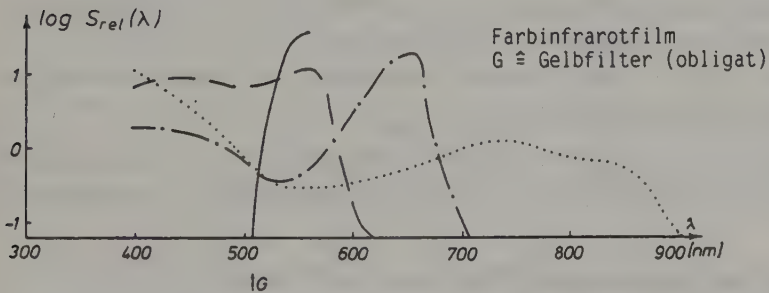
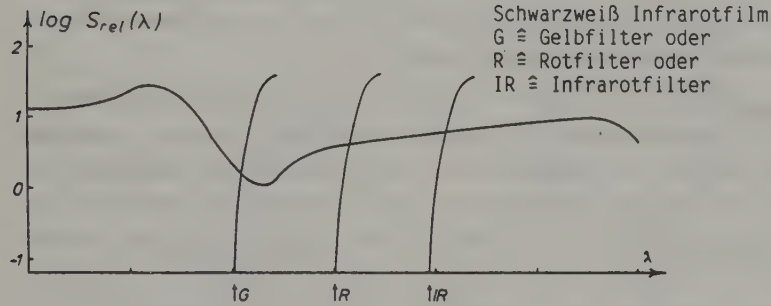
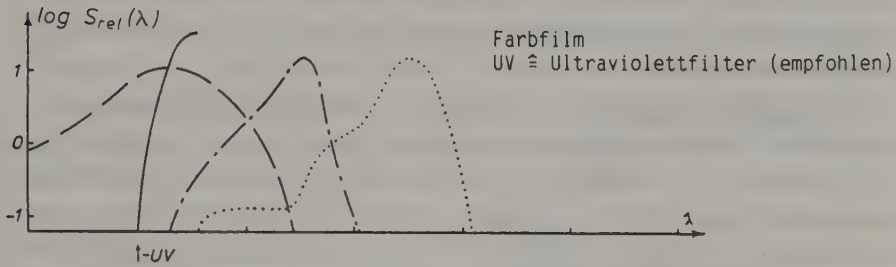
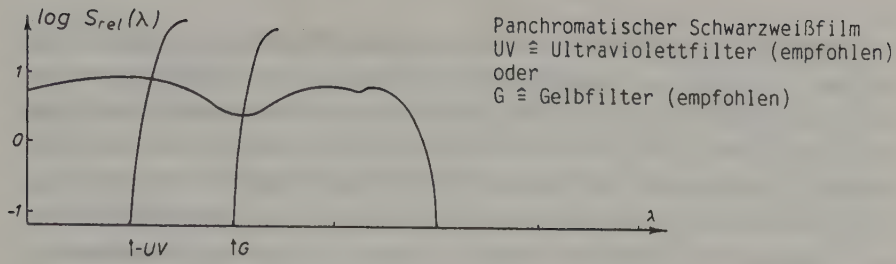


Bild 3.1-20: Spektrale Empfindlichkeit verschiedener Filmtypen  
 --- blau im Film, -.- grün im Film, ... rot im Film

Der Farbfilm "integriert" die in der Bildebene ankommende Objektstrahlung in drei verschiedenen Schichten, die blau, grün und rot eingefärbt werden. Man ist bemüht, mit dem Farbfilm die natürlichen Objektfarben wiederzugeben. Dies gelingt nur in einer groben Annäherung; aus den Kennlinien des Bildes 3.1-20 sieht man zum Beispiel, daß die rot eingefärbte Schicht sogar noch kleine Anteile aus dem Blaubereich enthält. Beim Farbfilm wird zwar das Spektrum des sichtbaren Lichtes in drei - allerdings Überlappende - Spektralbereiche aufgeteilt, aber aus dem jeweiligen Farbwert kann nicht sehr detailliert auf die einzelnen spektralen Anteile des sichtbaren Lichtes geschlossen werden.

Der Schwarzweiß-Infrarotfilm "integriert" die Objektstrahlung zwischen 500 und 900 nm (bei Verwendung eines Gelbfilters) oder zwischen 600 und 900 nm (bei Verwendung eines Rotfilters) oder zwischen 700 und 900 nm (bei Verwendung eines Infrarotfilters) zu einem Grauwert in jedem Bildpunkt. Bei Verwendung eines IR-Filters ist deshalb der jeweilige Grauwert ein Maß für die vom Objekt ausgehende und in der Bildebene der Kamera ankommende nahe Infrarotstrahlung der einzelnen Objektelemente.

Der Farbinfrarotfilm "integriert" - ebenfalls unter Beachtung der Kennlinien für die spektrale Empfindlichkeit - die in der Bildebene ankommende Objektstrahlung in drei Schichten, die blau, grün und rot eingefärbt werden. Bei Verwendung eines Gelbfilters geben - wie aus den Kennlinien des Bildes 3.1-20 ersichtlich - die drei Schichten folgende Objektstrahlung wieder:

- Die blaue Schicht in erster Linie die grüne Objektstrahlung,
- die grüne Schicht vor allem die rote Objektstrahlung und zu einem geringen Anteil auch die grüne Objektstrahlung und
- die rote Schicht verhältnismäßig gleichmäßig die Objektstrahlung im Bereich zwischen 500 und 900 nm.

Auch beim Farbinfrarotfilm kann aus den drei Farbwerten nicht sehr detailliert auf die einzelnen spektralen Anteile der Objektstrahlung geschlossen werden.

Als Vorteil der infrarotempfindlichen Filme sind zu nennen:

- a) Die Atmosphäre ist für den infraroten Spektralbereich "transparenter" als für den sichtbaren Spektralbereich (siehe Gleichungen (2.7-11) und (2.7-12)).

- b) Die Kontrastminderung durch das Luftlicht ist umso geringer, je langwelliger die Strahlung ist (siehe Tab. 2.7-5).
- c) insbesondere die Vegetation ist ein starker Infrarotstrahler (Bild 2.5-9 und Bild 2.5-11). Die größere Beleuchtungsstärke im Infraroten wird allerdings etwas gemindert durch die verhältnismäßig geringe spektrale Empfindlichkeit der Filme im Infraroten (siehe Kennlinien im Bild 3.1-20).
- d) Die infrarote Rückstrahlung der Vegetation ist, wie aus Bild 3.1-22 links ersichtlich, stark differenziert in Abhängigkeit von der Vegetationsart. Im Schwarzweiß-Infrarotbild erscheinen z.B. Laubbäume relativ hell und Nadelbäume dunkel. Im Farbinfrarotfilm sind die Laubbäume kräftig rot und die Nadelbäume dunkelbraun. Für Vegetationskartierungen sind deshalb unbedingt für nahes Infrarot sensibilisierte Filme zu verwenden.

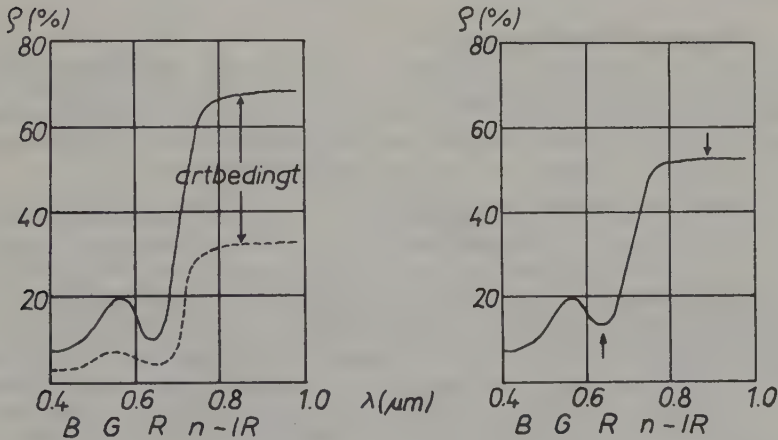


Bild 3.1-22: Spektrale Signatur für Laubbaumblätter in Abhängigkeit der Vegetationsart (links) und ihre Veränderung durch Schädigung der Vegetation (Vergleich der Kennlinie im rechten Schaubild mit der ausgezogenen Linie im linken Schaubild)

- e) Die infrarote Rückstrahlung der Vegetation ist auch ein Maß für Vegetationsschäden. Die Schädigung der Vegetation äußert sich in den spektralen Signaturen vor allem durch die Reduzierung der Infrarotstrahlung und durch eine geringfügige Verstärkung der Rotstrahlung (Bild 3.1-22, rechts). Geschädigte Bäume sind demnach im Schwarzweiß-Infrarot-

film dunkler als ihre gesunden Exemplare; im Farbinfrarotfilm sind geschädigte Bäume weniger rot und dafür mehr grün als artgleiche gesunde Bäume. Die im Infrarot sensibilisierten Filme "sehen" die Vegetationsschäden besser und - was jedoch nicht zuverlässig erwiesen ist - früher als das menschliche Auge. Beim Farbinfrarotfilm ist - wie aus dem Bild 3.1-22 ersichtlich - die Differenz zwischen dem roten und dem grünen Farbwert ein besonders empfindlicher Indikator für Vegetationsschäden. Die Vegetationsschäden kann man allerdings nur dann an Hand der Farbe im Farbinfrarotfilm erkennen, wenn man die Vegetationsart a priori - z.B. aus der Kronenform - kennt. Eine weitere Schwierigkeit tritt auf, da auch die Infrarotstrahlung gesunder Vegetation der gleichen Art im Laufe der Jahreszeit stark variiert.








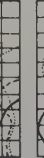

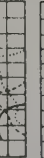
Zusätzliche Literatur: Albertz, Kreiling (1980), Akca et. al. (1984), Boehnel et al. (1980), Csaplovics (1982), Everitt et al. (1985), Murtha (1978).

#### 3.1.1.6 Charakteristika einiger Filme

In der Tab. 3.1-23 sind 10 verschiedene Filme für Luft- und Weltraumaufnahmen angeführt. Die Empfindlichkeit der Filme ist (teilweise) in DIN, AFS und EAFS (3.1.1.4.2) angegeben. Die ebenfalls in der Tab. 3.1-23 angegebene Gradation  $\gamma$  ist für den Kontrast der entwickelten Filme verantwortlich (3.1.1.4.2). Es überwiegen die kontrastverstärkenden Filme.

Das geometrische Auflösungsvermögen [lp/mm] der Filme ist in der Tab. 3.1-23 für zwei verschiedene Objektkontraste angegeben, und zwar für hohen Kontrast  $K = 1000:1$  ( $\hat{=}$  Dichtedifferenz  $\Delta D = 3$ ) und für niedrigen Kontrast  $K = 1.6:1$  ( $\hat{=}$  Dichtedifferenz  $\Delta D = 0.2$ ). Der niedrige Kontrast entspricht etwa den Bedingungen bei Luft- und Weltraumaufnahmen. Das geometrische Auflösungsvermögen hängt einerseits stark vom Objektkontrast und andererseits von der Empfindlichkeit der Filme ab. Der wenig empfindliche Kodak High Definition Aerial 3414 erreicht eine Auflösung - sogar bei niedrigem Objektkontrast - von 250 lp/mm. Man kann ihn in der Regel nur dann einsetzen, wenn die Kamera eine Bewegungskompensation besitzt (3.1.1.2.5). Empfindlichere Filme, wie sie für Kameras ohne Bewegungskompensation benötigt werden, haben - bei niedrigem Kontrast - eine Auflösung zwischen 32 und 125 lp/mm.



Hersteller	Produktbezeichnung und Schichtträgerart	Typ	Spektrale Empfindlichkeit $S_A$	Schichtträger- Dicke (mm)	Empfindlichkeit DIN AFS EAFS x	Empfänger- Entwickler	Geometrisches Auflösungsver- mögen (lp/mm) für Objektkontrast 100:1 $\Delta D$	Gradation Y	Verzö- gerung (RMSG)
Agfa- Gevaert	Aviphot Pan 150 Polyester	Pan +		0.10	18-22 100-250 x	G 74 c	143	1.3-2.1	45
Agfa- Gevaert	Aviphot Pan 200 Polyester	Pan +		0.10	20-25 160-500 x	G 74 c	100	0.9-1.7	50
Kodak	Plus-X-Aerographic 2402 Ester	Pan +		0.10	160 120-320	D-19 Versamat 885	100	1.3 1.0-2.0	50 70
Kodak	Panatomic-X Aerographic II 2412 Ester	Pan		0.10	40	Versamat 885	400	1.2-2.1	175 9
Kodak	High Definition Aerial 3414 Ester Thin Base	Pan +		0.06	6.4-8	Versamat 885	630	2.1-2.5	250 8
Kodak	Infrared Aerographic 2474 Ester	IR		0.10	320 x 200-800 x	D-19 Versamat 885	80	2.3 1.0-2.1	40 27
Kodak	Aerocolor Negative 2445 Ester	Color Neg.		0.10	100 x	Aero-Negative Color Process	80		40 13
Kodak	Ektachrome EF Aerographic 50-397 Ester	Color Pos.		0.10	64 x	EA-5	80	1.5	40 13
Kodak	Aerochrome HS 2448 Ester	Color Pos.		0.10	32 x	EA-5	80	2.0	40 13
Kodak	Aerochrome Infrared 2443 Ester	Color IR-Pos.		0.10	40 x	EA-5	63		32 17

Tab. 3.1-23: Charakteristika einiger Filme (Pan+ sind panchromatische Schichten mit erweiterter Rotempfindlichkeit)

Das geometrische Auflösungsvermögen des Filmes  $AV_f$ , der Kamera  $AV_k$  (3.1.1.2.4) und zufolge der Bildwanderung  $AV_w$  (3.1.1.2.5) setzen sich zu einem für den gesamten Prozeß repräsentativen Auflösungsvermögen  $AV_{ges}$  wie folgt zusammen (siehe Gleichung (3.1-7)):

$$\frac{1}{AV_{ges}^2} = \frac{1}{AV_f^2} + \frac{1}{AV_k^2} + \frac{1}{AV_w^2} \quad (3.1-24)$$

Fortsetzung des Zahlenbeispiels des Abschnittes 3.1.1.2.5: Man hat dort eine Detailerkennbarkeit von 17 cm auf der Erdoberfläche erhalten, wenn man die Meßkamera ( $AV_k = 150$  lp/mm) und die Bildwanderung ( $AV_w = 30$  lp/mm) in Betracht zieht. Mit Berücksichtigung eines Auflösungsvermögens  $AV_f = 50$  lp/mm des Filmes lautet das Auflösungsvermögen für den Gesamtprozeß (3.1-24):

$$\frac{1}{AV_{ges}^2} = \frac{1}{50^2} + \frac{1}{150^2} + \frac{1}{30^2} \rightarrow AV_{ges} = 25 \text{ lp/mm}$$

Größe eines Hell/Dunkel-Strichpaares im Abbild =  $1/25 = 0.04$  mm

Größe eines hellen oder dunklen Striches (Vernachlässigung  
der Überstrahlung) =  $0.04/2 = 0.02$  mm

Größe eines noch erkennbaren Details am Objekt mit Gleichung  
(3.1-1) =  $0.02 \cdot 1500/0.15 = 20$  cm

In der Tab. 3.1-23 ist noch die Körnigkeit der Filme in Form der root mean square granularity (RMSG) angegeben. RMSG gibt den subjektiven Eindruck der Körnigkeit wieder, der bei der Betrachtung des entwickelten Filmes unter mindestens etwa 12facher Vergrößerung auftritt; ein gängiges Maß für die RMSG ist die 1000fache Standardabweichung ( $\hat{=}$  mittlere Streuung) der Dichte, die durch die Kornstruktur eines photographischen Bildes erzeugt wird. Die Körnigkeit steigt mit der Dichte der entwickelten Filme. Es sollte daher keine größere Dichte als etwa 1.8 in den entwickelten Filmen auftreten (RMSG wird mit einer Dichte von 1.0 bestimmt). Die Körnigkeit ist außerdem bei kontrastverstärkenden Filmen verhältnismäßig groß; aus dieser Sicht dürfen keine Filme mit sehr großer Gradation  $\gamma$  gewählt werden. Schließlich ist noch zu erwähnen, daß die Körnigkeit auch das geometrische Auflösungsvermögen etwas beeinflusst. Zusätzliche Literatur: Albertz, Kreiling (1980), Graham, Read (1986), Manual of Remote Sensing (1983).

### 3.1.1.7 Photographische Folgeprodukte

Nach der Entwicklung der mit der Kamera belichteten Filme hat man ein photographisches Produkt der 1. Generation. Davon können in mehreren Varianten Kopien auf Film oder Papier hergestellt werden, die sich in der Qualität und im Preis sehr unterscheiden. Für die beiden wichtigsten Filmarten, nämlich einen Negativ-Schwarzweiß-Film (3.1.1.4.2) und einen Positivfarbfilm (3.1.1.4.3 und 3.1.1.4.4), sind im Bild 3.1-24 die Kopiermöglichkeiten zusammengestellt.

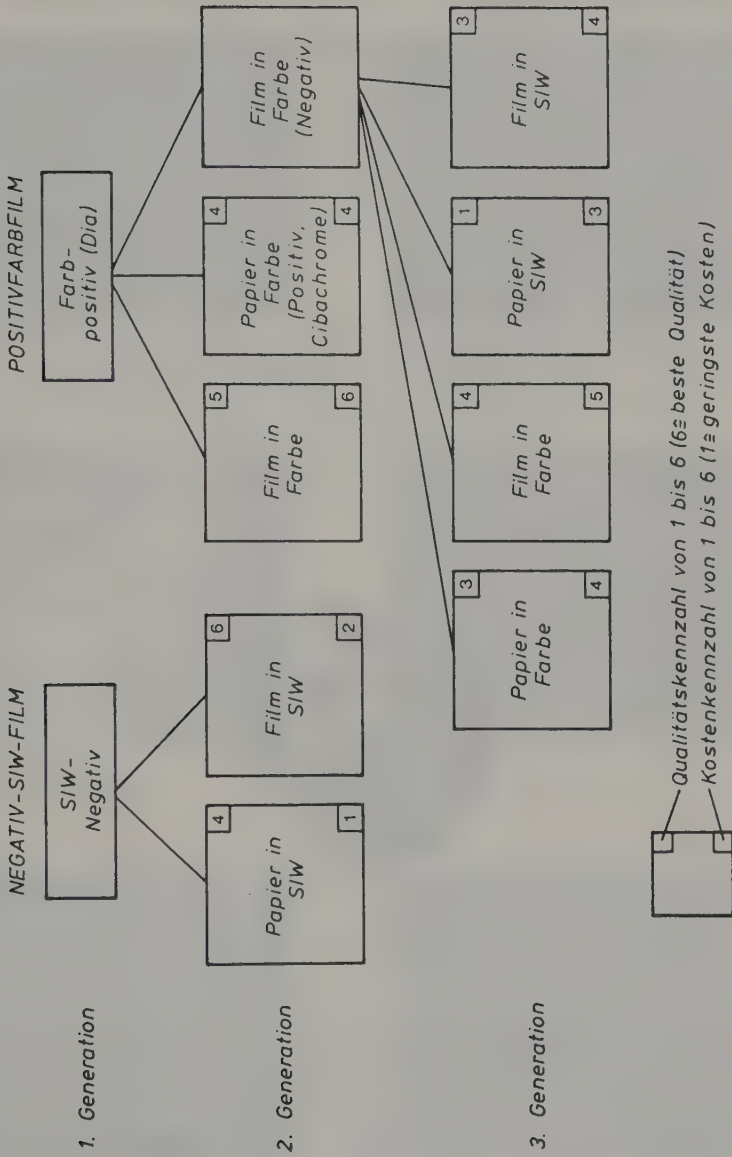
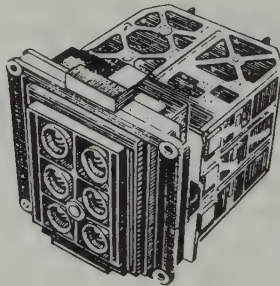


Bild 3.1-24: Verschiedene Möglichkeiten der Kopierung

### 3.1.2 Multispektralkamera

Der Farbfilm erlaubt, nur drei Spektralbereiche festzuhalten. Mit anderen Worten: Die spektralen Signaturen (z.B. Bild 3.1-22) werden nur an drei Punkten registriert, wobei jeder Punkt noch durch Mittelung der Strahlung einer verhältnismäßig großen Umgebung entsteht. In dem Bestreben, die Multispektralität von drei auf mehrere Bereiche auszudehnen, die Lage der Bereiche im Spektrum flexibel zu gestalten und die Breite der einzelnen Spektralbereiche ( $\hat{=}$  spektrale Auflösung) zu verkleinern, ist die Multispektralkamera entstanden.

Eine Multispektralkamera besteht aus mehreren, in einem Rahmen montierten Kameras (Bild 3.1-25). Die spektrale Zerlegung der Strahlung erfolgt mittels individueller Filter für jedes Objektiv. Das Ergebnis der Aufnahme sind Schwarzweißbilder, die die Bestrahlungsstärke im jeweiligen Spektralbereich in der Form von Grauwerten wiedergeben (Bild 3.1-26 und 3.1-27). Wie daraus farbige Bilder entstehen, wird erst im Abschnitt 6.3 besprochen.



*Bild 3.1-25: Multispektralkamera MKF-6 der Fa. Jenoptik, DDR*

Am bekanntesten ist die MKF-6 der Fa. Jenoptik (Bild 3.1-25). Einige technische Daten: Brennweite 125 mm (innere Orientierung nicht so stabil und genau bekannt wie bei einer Meßkamera), größte Blende 1:4, Format  $55 \times 80 \text{ mm}^2$ , Verzeichnung  $\pm 3 \text{ } \mu\text{m}$  (Überraschend gut, obwohl nicht die Verwirklichung einer exakten Zentralprojektion sondern ein gutes geometrisches Auflösungsvermögen im Vordergrund steht), Bewegungskompensation durch Drehung der Kamera im Moment der Aufnahme  $16.8 - 39.8 \text{ mrad} \cdot \text{s}^{-1}$ , Spektralbereiche  $0.46 - 0.50$ ,  $0.52 - 0.56$ ,  $0.58 - 0.62$ ,  $0.64 - 0.68$ ,  $0.70 - 0.74$ ,  $0.79 - 0.89 \text{ } \mu\text{m}$ . Geometrisches Auflösungsvermögen der Bilder  $160 \text{ lp/mm}$ .

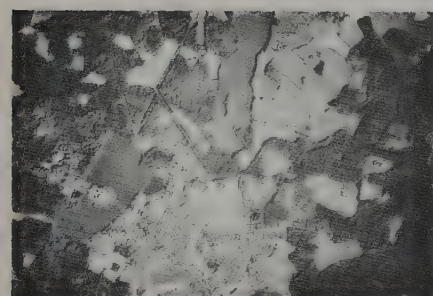
MKF-6  $f = 125 \text{ mm}$   $hg = 6100 \text{ m}$   $mb = 48800$  image size =  $55 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$



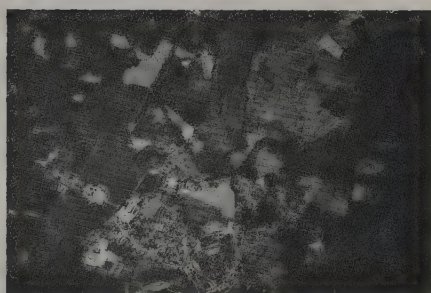
**Channel 1** 460-500 nm (blue-green) Type 28



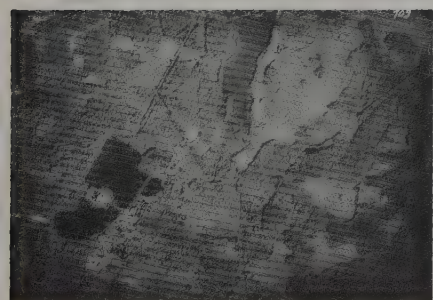
**Channel 2** 520-560 nm (green yellow) Type 28



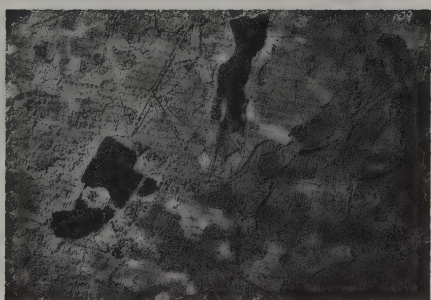
**Channel 3** 580-620 nm (yellow) Type 28



**Channel 4** 640-680 nm (red) Type 28



**Channel 5** 700-740 nm (infrared) Film I-740



**Channel 6** 790-890 nm (infrared) Film I-840

*Bild 3.1-26: Schwarzweißbilder der sechs Spektralbereiche der Multispektralkamera MKF-6*



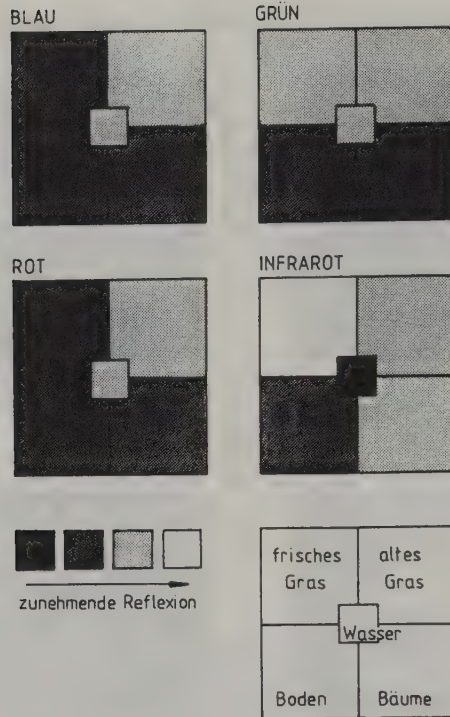


Bild 3.1-27: Die wahrscheinlichen Grauwerte von fünf Objektklassen in den Bildern einer 4-Kanalkamera im blauen, grünen, roten und infraroten Spektralbereich (entnommen aus Curran, 1985)

Die MKF-6 wird in großem Umfang bei den russischen Weltraummissionen eingesetzt. Das auf vier Spektralbereiche beschränkte Modell MSK-4 ist besonders für den Flugzeugeinsatz konzipiert (Nicolai, 1984).

Sehr bekannt wurde die 4-Kanalkamera S065 (Hasselblad mit Zeiss Planar), die bei der Mission Apollo 9 (1969) zum Einsatz kam, und die 6-Kanalkamera S190A (ITEK Corp.), mit der 1973 im Rahmen der Skylab-Mission sehr viele Bilder aufgenommen wurden.

Die französische Firma Matra bietet die Multispektralkamera Mark I an, die in vier Spektralbereichen aufnimmt. Die Spektralbereiche werden individuell durch Filterkombinationen ausgewählt. Das Format beträgt  $88 \times 88 \text{ mm}^2$ , wobei der Standardluftbildfilm mit einer Breite von 24 cm benutzt werden kann. Es stehen zwei Objektive zur Auswahl: Brennweite 100 mm und 150 mm jeweils mit einer größten Blende von 1:2.8.

Die Ausführungen über Abbildungsschärfe (3.1.1.2), Strahlungsmessung (3.1.1.3) und Photographie (3.1.1.4) gelten im wesentlichen auch für die Multispektralkamera.

### 3.2 Abtastsysteme (scanner)

Die photographischen Systeme sind für eine systematische Aufnahme der Erde mit unbemannten Satelliten ungeeignet. Der Transport der belichteten Filme vom Satelliten zur Erde ist nämlich sehr schwerfällig. Die Forderung einer nachrichtentechnischen Übertragung der empfangenen Informationen initiierte die Entwicklung zeilenweise abtastender Systeme (scanner). Diese Abtaster haben gegenüber der Photographie zwar einige Nachteile; als Vorteil soll aber bereits jetzt erwähnt werden, daß mit ihnen die elektromagnetische Strahlung - einschließlich des thermischen Infrarots - in sehr vielen Spektralbereichen aufgenommen werden kann.

#### 3.2.1 Mechanische Abtaster (Rotationsabtaster)

##### 3.2.1.1 Gerätetechnisches und Operationelles

Die Erdoberfläche wird während des Fluges zeilenweise senkrecht zur Flugrichtung abgetastet (Bild 3.2-1)<sup>1</sup>. Die Abtastung geschieht mit einem rotierenden Prisma, dessen spiegelnde Ebene mit der Flugrichtung einen Winkel von 50 gon einschließt (Bild 3.2-2). Die auf die spiegelnde Ebene treffende Strahlung wird auf die (stationären) Hohlspiegel eines Teleskopes gelenkt. Ein halbdurchlässiger Spiegel ( $\hat{=}$  dichroitischer Strahlenteiler) leitet einen Teil der Strahlung auf einen Detektor, der in der Brennebene des Teleskopes angeordnet und für die Thermalstrahlung sensibilisiert ist. Dieser Detektor muß gekühlt werden. Die von der Erdoberfläche ausgehende und auf den Thermaldetektor treffende Strahlung wird an den optischen Teilen nur reflektiert. Der Thermalstrahlung stehen keine Hindernisse im Weg, wie z.B. Linsen aus normalem optischen Glas. Das normale optische Glas ist nämlich für die Thermalstrahlung nicht transparent (Bild 3.1-8).

---

<sup>1</sup> Genau genommen stehen die Zeilen - abhängig von der Plattformgeschwindigkeit und der Rotationsgeschwindigkeit des Prismas - nicht genau orthogonal zur Flugrichtung. Im Abschnitt 6.4.2.1 wird auf diese sogenannte Zeilenschiefe, die in der Praxis sehr klein ist, näher eingegangen.

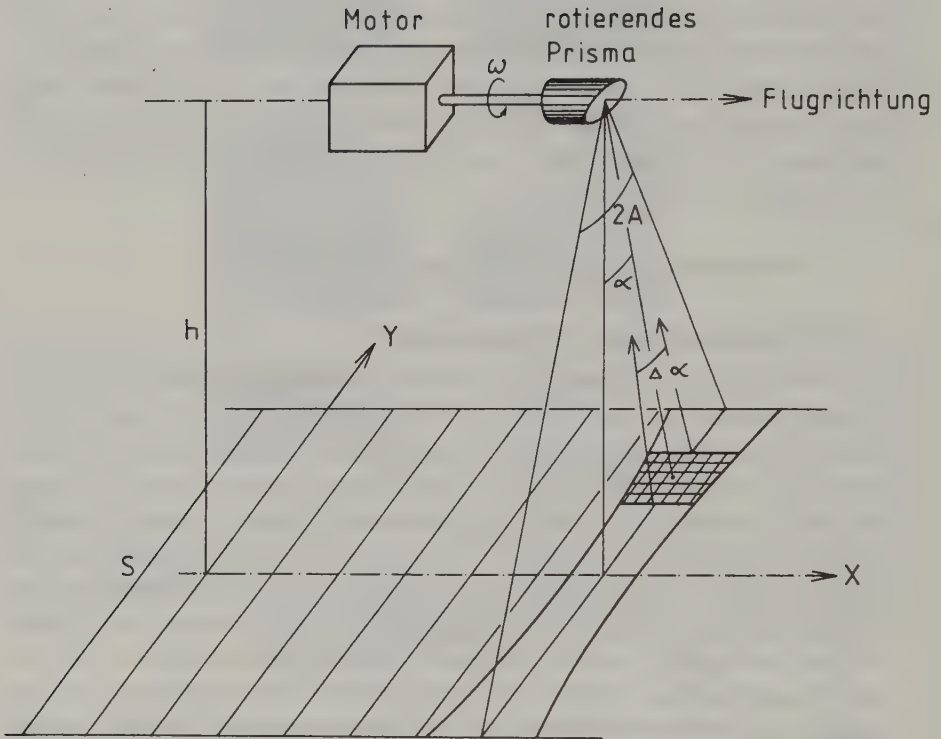


Bild 3.2-1: Zeilenweise Abtastung senkrecht zur Flugrichtung

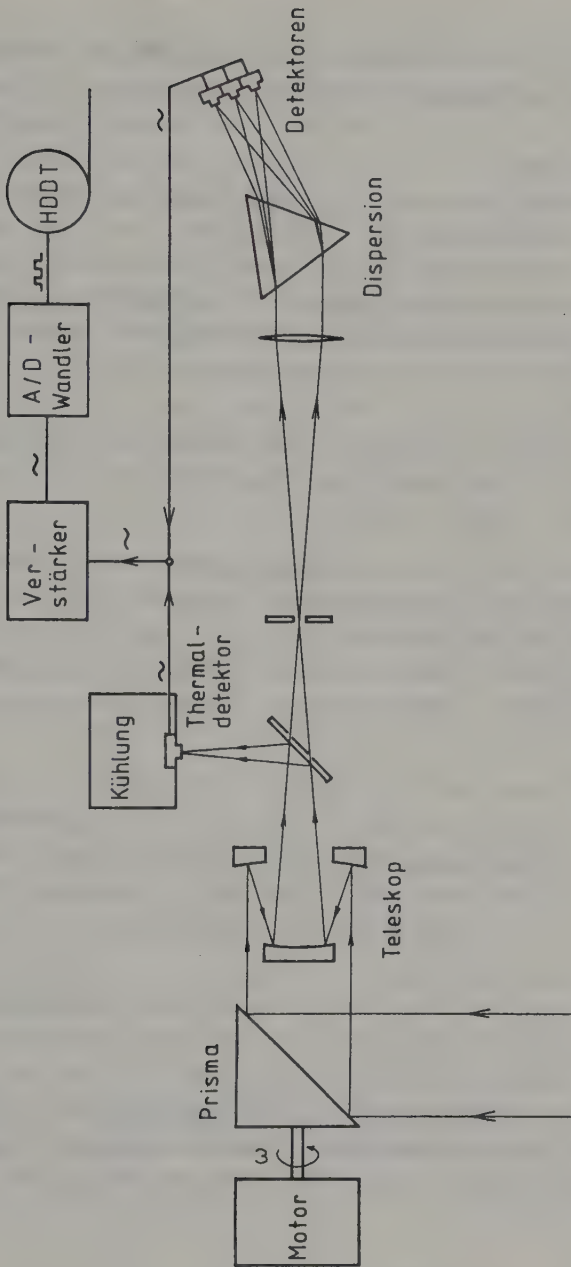


Bild 3.2-2: Konstruktionsprinzip eines multispektralen Abtasters

Der andere Teil der Strahlung, also die Strahlung des sichtbaren Lichtes und des nahen und mittleren Infrarot, durchdringt den halbdurchlässigen Spiegel (Bild 3.2-2) und wird mittels eines Prismas - oder eines anderen optischen Elementes - in seine spektralen Anteile zerlegt. Nach einer solchen Dispersion kann durch die Positionierung des jeweiligen Detektors, der für die gesamte Strahlung des sichtbaren Lichtes bzw. des nahen und mittleren Infrarot empfindlich sein darf, der jeweilige (sehr schmale) Spektralbereich erfaßt werden. Diese schmalen Spektralbereiche werden auch als Kanäle (channels) oder Bänder (bands) bezeichnet. Abtaster mit mehr als einem Detektor sind sogenannte multispektrale Abtaster (multispectral scanner  $\hat{=}$  MSS).

Der von den Detektoren abgegebene Photostrom ist etwa proportional zur Intensität der vom jeweiligen Detektor absorbierten Strahlung. Diese Signale müssen zunächst verstärkt werden (Bild 3.2-2).

Anschließend erfolgt eine Analog/Digitalwandlung vor allem deshalb, weil ein auf Magnetband aufgezeichnetes bzw. nachrichtentechnisch übertragenes digitales Signal, auch wenn es verrauscht ist, ohne nennenswerte Schwierigkeiten wieder rekonstruiert werden kann. Verrauschte Analogsignale sind dagegen nur mit großem Aufwand - teilweise überhaupt nicht mehr - rekonstruierbar.

Das digitale Signal wird - wie im Bild 3.2-2 angedeutet - bei einer Flugzeugmission synchron mit der Abtastung auf ein Magnetband mit großer Schreibdichte (high density digital tape  $\hat{=}$  HDDT) aufgezeichnet. Mit speziellen EDV-Anlagen setzt man dann die HDDTs in sogenannte CCTs (computer compatible tape) um.<sup>1</sup> Wie daraus photographische Bilder entstehen, wird im Abschnitt 6.3 besprochen.

Bei Satellitenmissionen wird das digitale Signal nachrichtentechnisch zu einer Bodenstation übertragen und dort auf Magnetband aufgezeichnet. Bei den meisten Satellitensystemen besteht aber auch die Möglichkeit, das Signal während der Abtastung zunächst auf Magnetband aufzuzeichnen. Im Empfangsbereich einer Bodenstation wird dann das Magnetband im Satelliten abgespielt und die Signale werden nachrichtentechnisch zur Bodenstation übertragen.

---

<sup>1</sup> Die Informationsdichte eines HDDT im Vergleich zu einem CCT mit 1600 bpi kann das 100fache betragen. Vor kurzem kamen auch Abtaster für Flugzeuge auf den Markt, die direkt auf CCTs aufzeichnen.



Damit die abgetasteten Zeilen in der Streifenmitte lückenlos zusammenpassen (Bild 3.2-1), muß folgende Beziehung gelten ( $\nu \hat{=}$  Abtastfrequenz,  $V \hat{=}$  Plattformgeschwindigkeit):

$$\Delta\alpha \cdot h \cdot \nu = V \quad \rightarrow \quad \frac{V}{h} = \Delta\alpha \cdot \nu \quad (3.2-1)$$

Dieses Verhältnis von Plattformgeschwindigkeit zur Flughöhe ist durch den Öffnungswinkel  $\Delta\alpha$  des Abtasters (IFOV  $\hat{=}$  instantaneous field of view) und die Abtastfrequenz  $\nu$  (scan rate) festgelegt. Der Öffnungswinkel ergibt sich aus der Beziehung  $\Delta\alpha = d_D/f$  ( $d_D \hat{=}$  Durchmesser des Detektors;  $f \hat{=}$  Brennweite der Abtastoptik). Für zwei typische Abtaster sind die Daten in der folgenden Tabelle zusammengefaßt. Es handelt sich um Abtaster der Fa. Daedalus, USA, die in Flugzeugen benutzt werden.

	AADS1268	AA3500
Öffnungswinkel $\Delta\alpha$ (Bild 3.2-1)	1.25 oder 2.5 mrad	1.7 oder 2.5 mrad
Gesamtöffnungswinkel $2\Delta\alpha$ (Bild 3.2-1)	47.7 gon ( $\Delta\alpha=1.25$ ) 95.5 gon ( $\Delta\alpha=2.5$ )	64.9 gon ( $\Delta\alpha=1.7$ ) 95.5 gon ( $\Delta\alpha=2.5$ )
Abtastfrequenz $\nu$	12.5 oder 25 oder 50 Zeilen/s	80 Zeilen/s
Verhältnis $V/h$ (3.2-1)	0.016, 0.031, 0.062 s <sup>-1</sup> ( $\nu=12.5, 25, 50$ und $\Delta\alpha=1.25$ ) 0.031, 0.062, 0.125 s <sup>-1</sup> ( $\nu=12.5, 25, 50$ und $\Delta\alpha=2.5$ )	0.14 s <sup>-1</sup> ( $\Delta\alpha=1.7$ ) 0.20 s <sup>-1</sup> ( $\Delta\alpha=2.5$ )

Tab. 3.2-3: Einige technische Daten von zwei Daedalus-Abtastern  
(das Bild 3.2-4 zeigt den AADS1268)

Zahlenbeispiel: Für den Daedalus AA3500 ( $\Delta\alpha = 2.5$  mrad) ergibt sich für eine Flughöhe von 2500 m folgende Geschwindigkeit des Flugzeuges:  $V = 0.2 \cdot 2500 = 500$  m/s  $\hat{=}$  1800 km/h. Diese Fluggeschwindigkeit ist für Flugzeuge viel zu groß. Der AA3500 ist demnach für sehr niedrige Flughöhen konzipiert. Für den Daedalus AADS1268 ( $\Delta\alpha = 2.5$  mrad,  $\nu = 12.5$  s<sup>-1</sup>) ergeben sich dagegen akzeptable Fluggeschwindigkeiten:  $V = 0.031 \cdot 2500 = 77.5$  m/s  $\hat{=}$  279 km/h.

Aufgabe 3.2-1: Der Daedalus AA3500 ( $\Delta\alpha = 1.7$  mrad) soll mit einem Flugzeug, das mit einer Geschwindigkeit von 300 km/h fliegt, eingesetzt werden. Wie ist die Flughöhe zu wählen, damit sich die abgetasteten Zeilen lückenlos nebeneinanderreihen?

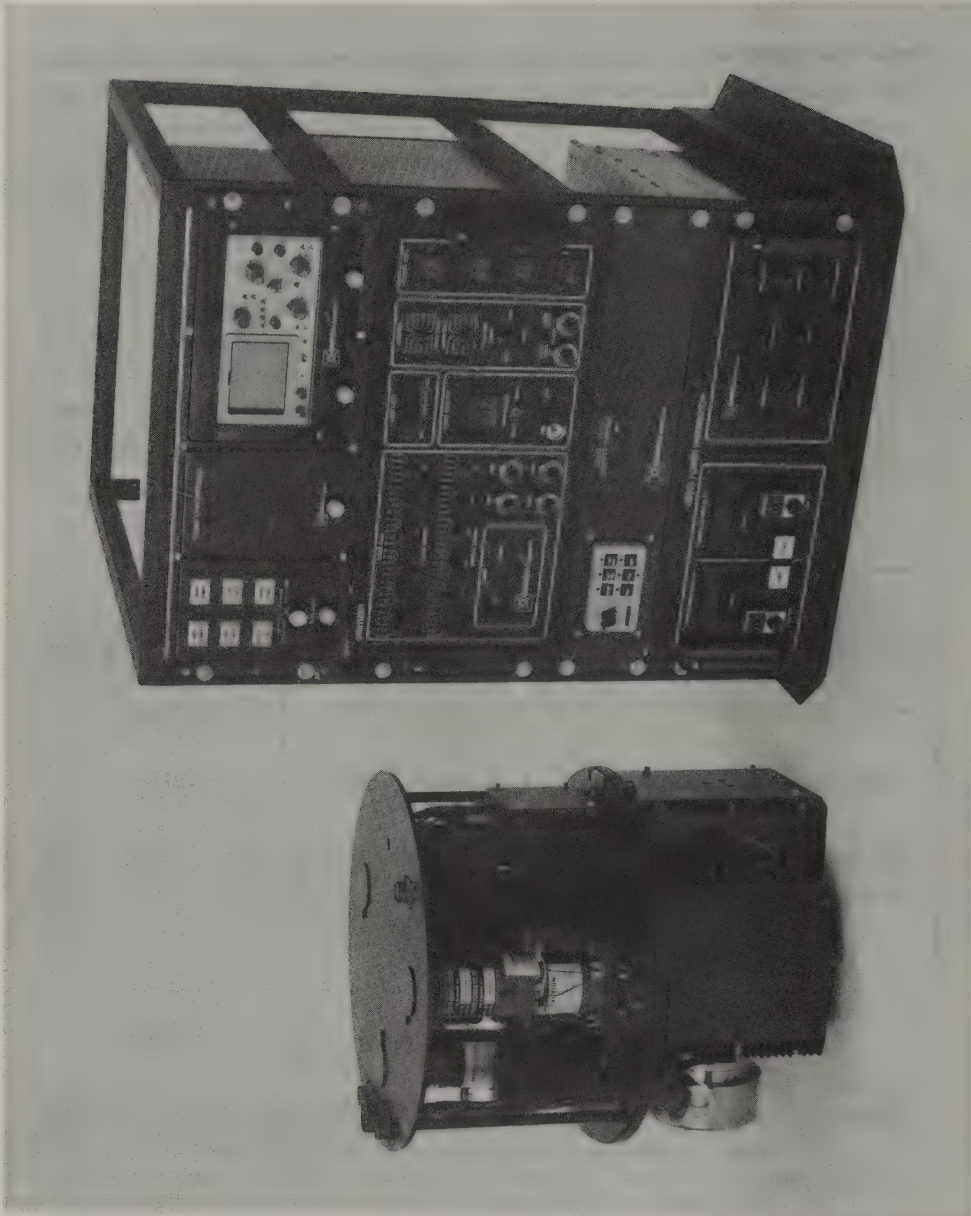


Bild 3.2-4: Abtaster AADS1268 von Daedalus Enterprises, Inc., Ann Arbor, Michigan, USA

Für einen flexiblen Einsatz der Abtaster ist es von Vorteil, wenn aus mehreren Abtastfrequenzen  $\nu$  und auch aus mehreren Öffnungswinkeln  $\Delta\alpha$  gewählt werden kann. Im praktischen Einsatz werden die benachbarten Zeilen einander dennoch häufig überlappen (overscan). Eine solche Überlappung ist zum Teil wünschenswert (siehe Abschnitt 3.2.1.2) und auf jeden Fall wesentlich besser als auftretende Lücken (underscan).

Auf die Spektralbereiche der Abtaster, insbesondere die der Fa. Daedalus, wird im Abschnitt 3.2.1.3 eingegangen.

### 3.2.1.2 Geometrisches Auflösungsvermögen und Kontrastübertragung

Das Auflösungsvermögen einer Scanneraufnahme wird in erster Linie von der Größe des Bildelementes<sup>1</sup> geprägt (Bild 3.2-1). Seine Größe im Gelände ergibt sich als Projektion der Detektorfläche durch das optische System des Abtasters auf die Erdoberfläche. Die Größe eines Bildelementes beträgt in Streifenmitte  $\Delta Y_0 = \Delta X_0 = h \cdot \Delta\alpha$  (Bild 3.2-1 und Bild 3.2-5). Die Abmessungen  $\Delta X$  und  $\Delta Y$  des Bildelementes unter dem Beobachtungswinkel  $\alpha$  betragen dann:

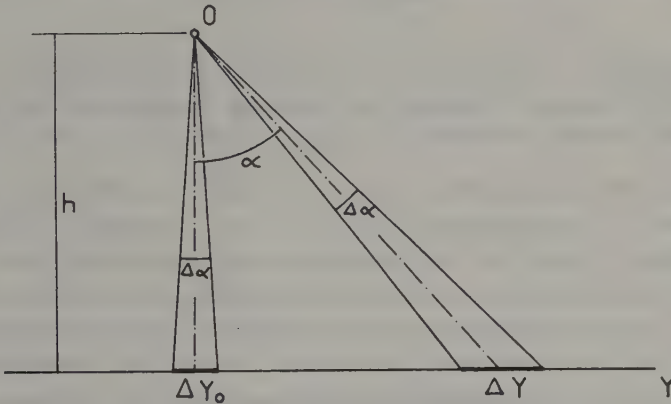


Bild 3.2-5: Vergrößerung der Bildelemente außerhalb der Streifenmitte

$$\Delta Y = \frac{h \cdot \Delta\alpha}{\cos^2 \alpha} = \frac{\Delta Y_0}{\cos^2 \alpha} = n_y \cdot \Delta Y_0 \quad (3.2-2)$$

<sup>1</sup> Dafür ist auch das Kunstwort Pixel (= picture xelement) gebräuchlich.

$$\Delta X = \frac{h \cdot \Delta \alpha}{\cos \alpha} = \frac{\Delta X_0}{\cos \alpha} = n_x \cdot \Delta X_0 \quad (3.2-3)$$

Im Bild 3.2-6 sind die Faktoren  $n_x$  und  $n_y$  in Abhängigkeit vom Winkel  $\alpha$  aufgetragen.

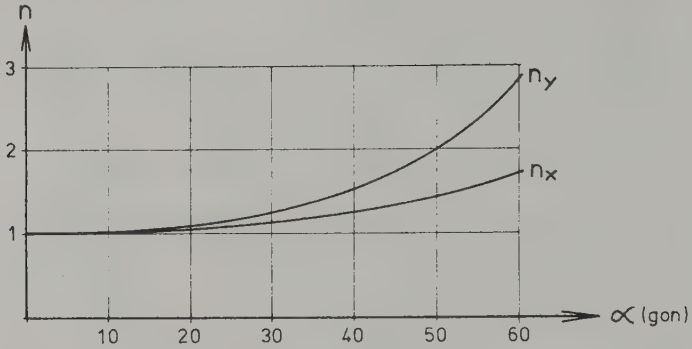


Bild 3.2-6:  $n$ -fache Zunahme der Bildelemente in Abhängigkeit vom Winkel  $\alpha$

Zahlenbeispiel: Das Bildelement in Streifenmitte einer Aufnahme mit einem Daedalus-Abtaster ( $\Delta \alpha = 2.5$  mrad) (Tab. 3.2-3) aus 2000 m Flughöhe beträgt:  $\Delta X_0 = \Delta Y_0 = \Delta \alpha \cdot 2000 = 0.0025 \cdot 2000 = 5$  m. Am Streifenrand, also bei  $\alpha = \pm 47.7$  gon betragen die Ausmaße  $\Delta X = 1.37 \cdot 5 = 6.8$  m;  $\Delta Y = 1.89 \cdot 5 = 9.4$  m.

Innerhalb eines Bildelementes wird die Strahldichte  $L$  zu einem repräsentativen Wert  $\bar{L}$  zusammengefaßt (Bild 3.2-7). In Y-Richtung, also quer zur Flugrichtung, handelt es sich um eine gleitende Mittelwertbildung. Wir beziehen in den folgenden Betrachtungen das Auflösungsvermögen auf die Größe  $\Delta Y$  bzw.  $\Delta X$  eines Bildelementes, die allerdings entsprechend den Formeln (3.2-2) und (3.2-3) variiert. (Die Probleme, die bei der Bildwiedergabe mit der variierenden Bildelementgröße auftreten, werden erst im Abschnitt 6.3 behandelt.)

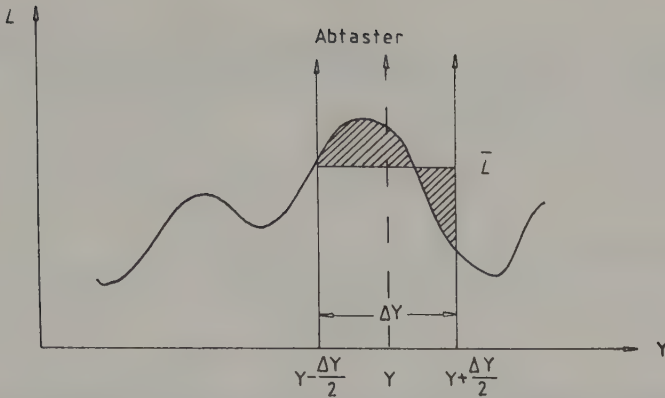


Bild 3.2-7: Gleitende Mittelwertbildung bei der Abtastung

Die von der Erdoberfläche ausgehende Strahldichte  $L(X,Y)$  ist eine Funktion von  $X$  und von  $Y$ . Wir vernachlässigen zunächst einmal die  $X$ -Abhängigkeit und beschreiben  $L(Y)$  als Fourierreihe:

$$L(Y) = L_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \left( a_k \cos \frac{2\pi Y}{l_k} + b_k \sin \frac{2\pi Y}{l_k} \right) \quad l_k = \frac{B}{k} \quad (3.2-4)$$

Dabei ist  $B$  die Breite des abgetasteten Streifens. Die Reziprokwerte der Wellenlängen  $l_k$  werden mit Ortsfrequenzen  $f_k$  bezeichnet:

$$f_k = \frac{1}{l_k} \quad (3.2-5)$$

Damit lautet (3.2-4):

$$L(Y) = L_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos(2\pi f_k Y) + b_k \sin(2\pi f_k Y)) \quad (3.2-6)$$

Eine äquivalente Darstellung ist:

$$L(Y) = L_0 + \sum_{k=1}^{\infty} c_k \cos(2\pi f_k Y - \phi_k), \quad (3.2-7)$$

wobei  $\phi_k$  als Phase und  $c_k$  als Amplitude bezeichnet wird. Den Übergang von (3.2-7) auf (3.2-6) sieht man aus folgender Umformung:



$$c_k \cos(2\pi f_k Y - \phi_k) = c_k \cos(2\pi f_k Y) \cos \phi_k + c_k \sin(2\pi f_k Y) \sin \phi_k.$$

Ein Vergleich mit (3.2-6) ergibt:

$$a_k = c_k \cos \phi_k \quad b_k = c_k \sin \phi_k \quad (3.2-8)$$

Die Übergangsformeln von (3.2-6) in (3.2-7) lauten:

$$\tan \phi_k = \frac{b_k}{a_k} \quad c_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \quad (3.2-9)$$

Zahlenbeispiel: Die Funktion  $L(Y)$  bestehe nur aus drei Wellenlängen bzw. Frequenzen. Formel (3.2-6), wobei auf eine Dimensionierung von  $L(Y)$  und  $Y$  verzichtet wurde:

$$L(Y) = 40 + 20 \sin \frac{2\pi Y}{100} + 10 \cos \frac{2\pi Y}{50} + 8 \cos \frac{2\pi Y}{33.3} + 5 \sin \frac{2\pi Y}{33.3}$$

Übergang auf die Formel (3.2-7) mit (3.2-9) (Bild 3.2-8):

$$L(Y) = 40 + 20 \cos \left( \frac{2\pi Y}{100} - \frac{\pi}{2} \right) + 10 \cos \frac{2\pi Y}{50} + 9.43 \cos \left( \frac{2\pi Y}{33.3} - 0.5586 \right)$$

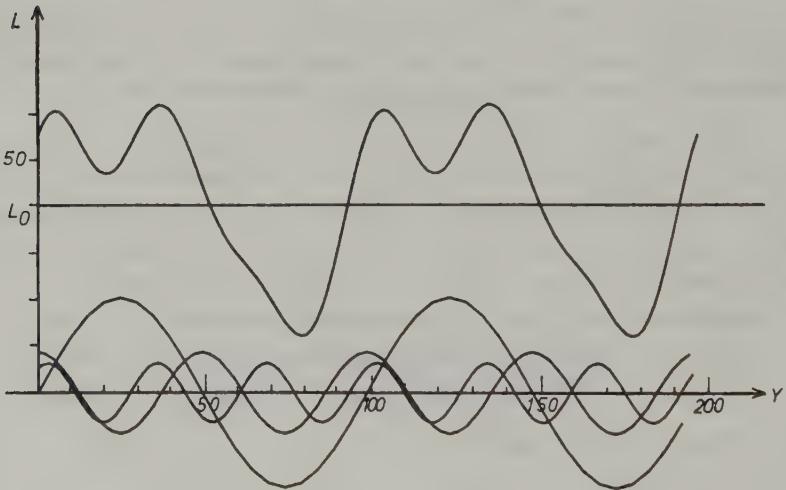


Bild 3.2-8: Funktion der Strahlungswerte

Die durch die gleitende Mittelwertbildung veränderte Funktion  $\bar{L}(Y)$  ergibt sich - wie aus dem Bild 3.2-7 ersichtlich - aus folgender Beziehung, die

ein bestimmtes Integral im Intervall  $[Y - \Delta Y/2, Y + \Delta Y/2]$  enthält:<sup>1</sup>

$$\bar{L}(Y) = \frac{1}{\Delta Y} \int_{Y - \frac{\Delta Y}{2}}^{Y + \frac{\Delta Y}{2}} L(Y) dY \quad (3.2-10)$$

Für die ursprüngliche Funktion  $L(Y)$  haben wir bereits die Fourierreihe (3.2-6) eingeführt:

$$\bar{L}(Y) = \frac{1}{\Delta Y} \int_{Y - \frac{\Delta Y}{2}}^{Y + \frac{\Delta Y}{2}} \left( L_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos(2\pi f_k Y) + b_k \sin(2\pi f_k Y)) \right) dY$$

Auflösung des bestimmten Integrales:

$$\bar{L}(Y) = \left[ \frac{L_0 Y}{\Delta Y} \right]_{Y - \frac{\Delta Y}{2}}^{Y + \frac{\Delta Y}{2}} + \left[ \frac{1}{\Delta Y} \sum_{k=1}^{\infty} \left( \frac{a_k}{2\pi f_k} \sin(2\pi f_k Y) - \frac{b_k}{2\pi f_k} \cos(2\pi f_k Y) \right) \right]_{Y - \frac{\Delta Y}{2}}^{Y + \frac{\Delta Y}{2}}$$

Einsetzen der Intervallgrenzen:

$$\bar{L}(Y) = L_0 + \frac{1}{\Delta Y} \sum_{k=1}^{\infty} \left( \frac{a_k}{2\pi f_k} \left( \sin 2\pi f_k \left( Y + \frac{\Delta Y}{2} \right) - \sin 2\pi f_k \left( Y - \frac{\Delta Y}{2} \right) \right) - \frac{b_k}{2\pi f_k} \left( \cos 2\pi f_k \left( Y + \frac{\Delta Y}{2} \right) - \cos 2\pi f_k \left( Y - \frac{\Delta Y}{2} \right) \right) \right)$$

Berücksichtigung der trigonometrischen Funktionen

$$(\sin \alpha - \sin \beta) = 2 \cos \frac{\alpha + \beta}{2} \sin \frac{\alpha - \beta}{2} \quad \text{und} \quad (\cos \alpha - \cos \beta) = -2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \sin \frac{\alpha - \beta}{2} :$$

$$\bar{L}(Y) = L_0 + \frac{1}{\Delta Y} \sum_{k=1}^{\infty} \left( \frac{a_k}{\pi f_k} \cos(2\pi f_k Y) \sin(\pi f_k \Delta Y) + \frac{b_k}{\pi f_k} \sin(2\pi f_k Y) \sin(\pi f_k \Delta Y) \right)$$

Umstellung:

<sup>1</sup> Im Abschnitt 6.7.1 wird die gleitende Mittelwertbildung nochmals aufgegriffen und als Faltung mit einer rechteckigen Filterfunktion formuliert.

$$\bar{L}(Y) = L_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(\pi f_k \Delta Y)}{\pi f_k \Delta Y} (a_k \cos(2\pi f_k Y) + b_k \sin(2\pi f_k Y)) \quad (3.2-11)$$

Übergang auf die der Darstellung (3.2-7) entsprechenden Beziehung:

$$\bar{L}(Y) = L_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(\pi f_k \Delta Y)}{\pi f_k \Delta Y} c_k \cos(2\pi f_k Y - \phi_k) \quad (3.2-12)$$

Die durch gleitende Mittelwertbildung veränderte Funktion  $\bar{L}(Y)$  wird entscheidend von der Größe  $\Delta Y$  des Bildelementes beeinflusst.

Fortsetzung des Zahlenbeispiels: Wählt man  $\Delta Y = 0$ , d.h. die Abtastung geschieht mit einem unendlich kleinen Bildelement, so wird  $\sin(\pi f_k \Delta Y) / (\pi f_k \Delta Y) = 1$ . In diesem Fall entspricht  $\bar{L}(Y)$  (3.2-12) der ursprünglichen Funktion  $L(Y)$  (3.2-7); es findet - wie erwartet - keine Verfälschung statt.

Wählt man  $\Delta Y = 16.6$ , d.h. das Bildelement bei der Abtastung entspricht der Hälfte der kürzesten Wellenlänge  $l_3$ , so ergibt sich mit der Beziehung (3.2-12):

$$\bar{L}(Y) = 40 + 19.10 \cos\left(\frac{2\pi Y}{100} - \frac{\pi}{2}\right) + 8.27 \cos\frac{2\pi Y}{50} + 6.00 \cos\left(\frac{2\pi Y}{33.3} - 0.5586\right)$$

Diese Funktion ist im Bild 3.2-9 dargestellt.

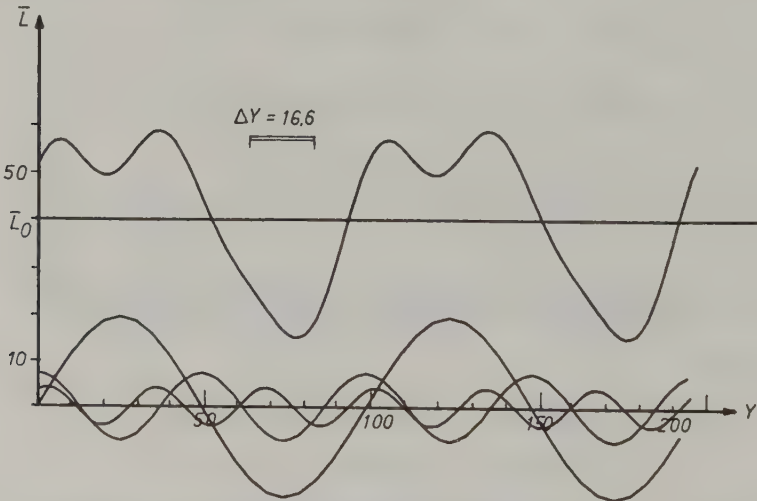


Bild 3.2-9: Verfälschung der Funktion des Bildes 3.2-8 durch Abtastung mit einer Bildelementgröße  $\Delta Y = 16.6$

Ergebnis: Die kurzwelligen bzw. hochfrequenten Anteile werden wesentlich stärker gedämpft als die langwelligen bzw. niederfrequenten Anteile.

Wählt man  $\Delta Y = 33.3$ , d.h. das Bildelement bei der Abtastung entspricht der kürzesten Wellenlänge  $l_3$ , so ergibt sich mit der Gleichung (3.2-12):

$$\bar{L}(Y) = 40 + 16.54 \cos\left(\frac{2\pi Y}{100} - \frac{\pi}{2}\right) + 4.13 \cos\frac{2\pi Y}{50}$$

Diese Funktion ist im Bild 3.2-10 dargestellt.

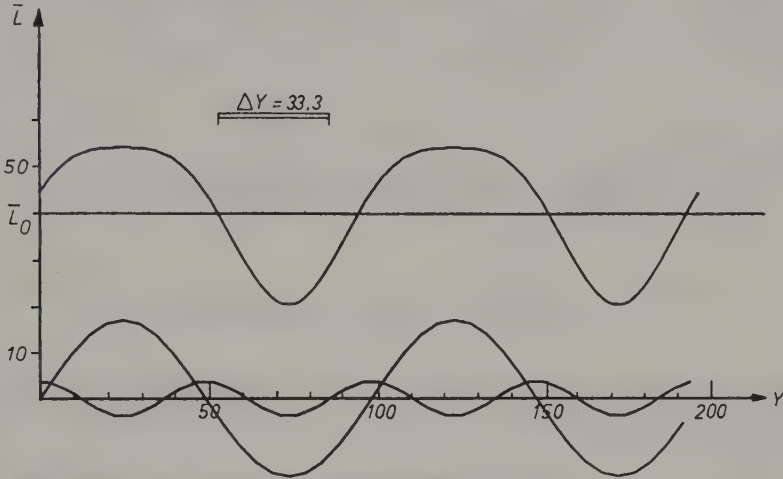


Bild 3.2-10: Verfälschung der Funktion des Bildes 3.2-8 durch Abtastung mit einer Bildelementgröße  $\Delta Y = 33.3$

Ergebnis: Der Anteil der Funktion, deren Wellenlänge der Bildelementgröße entspricht, wird völlig ausgelöscht.

Wählt man  $\Delta Y = 50$ , d.h. das Bildelement bei der Abtastung entspricht der mittleren Wellenlänge  $l_2$ , so ergibt sich aus der Gleichung (3.2-12):

$$\bar{L}(Y) = 40 + 12.74 \cos\left(\frac{2\pi Y}{100} - \frac{\pi}{2}\right) - 2.00 \cos\left(\frac{2\pi Y}{33.3} - 0.5586\right)$$

Diese Funktion ist im Bild 3.2-11 dargestellt.

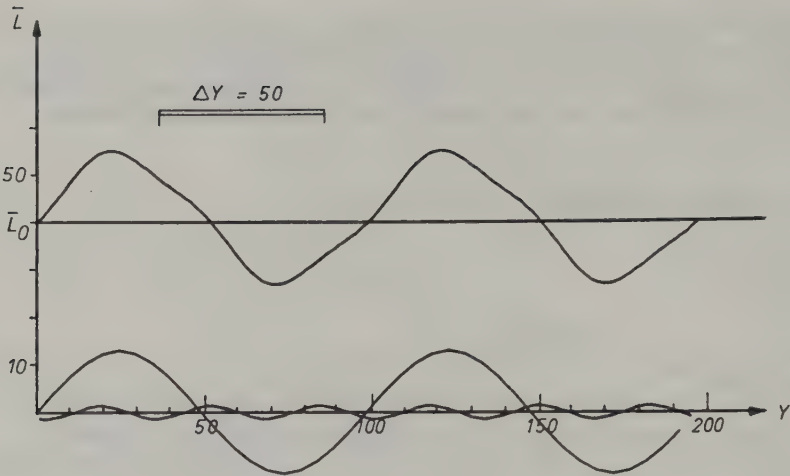


Bild 3.2-11: Verfälschung der Funktion des Bildes 3.2-8 durch Abtastung mit einer Bildelementgröße  $\Delta Y = 50$

Ergebnis: Der Anteil der Wellenlänge  $l_2$  wird ausgelöscht; der Anteil der Wellenlänge  $l_3$  wird einerseits gedämpft und andererseits geschieht eine Umkehrung der Amplituden.

Die gleitende Mittelwertbildung dämpft mit Verkürzung der Wellenlänge  $l_k$  - also mit Verkleinerung der Streifenbreite unterschiedlicher Strahldichte - die Kontraste. Entspricht die Wellenlänge genau der Bildelementgröße, so verschwinden die Kontraste vollkommen. Bei noch kürzeren Wellenlängen bilden sich wieder Kontraste, eventuell aber mit umgekehrtem Vorzeichen, d.h. helle Stellen werden dunkel und dunkle Stellen werden hell. Die erwähnte Kontrastminderung mit Verkleinerung der Wellenlänge kann durch aufwendige Filterung (6.7.3) korrigiert werden.

Die Kontrastminderung kann man formelmäßig angeben. Ein Vergleich der Beziehungen (3.2-7) und (3.2-12) liefert die gesuchte Funktion, die als (Kontrast-)Übertragungsfunktion  $H(f_k, \Delta Y)$  bezeichnet wird:



$$H(f_k, \Delta Y) = \frac{\sin(\pi \cdot f_k \cdot \Delta Y)}{\pi \cdot f_k \cdot \Delta Y} = \text{sinc}(\pi \cdot f_k \cdot \Delta Y) = \frac{\bar{c}_k}{c_k} \quad (3.2-13)^1$$

Diese Übertragungsfunktion wird in der Nachrichtentechnik als sinc-Funktion bezeichnet; sie ist im Bild 3.2-12 dargestellt. Die Kontrastübertragungsfunktion  $H(f_k, \Delta Y)$  ist das Verhältnis der Amplituden  $\bar{c}_k$  des "Bild"-Signales  $\bar{L}(Y)$  zu den Amplituden  $c_k$  des "Objekt"-Signales  $L(Y)$ . Die Kontrastübertragungsfunktion wird Eins (d.h. es tritt keine Dämpfung ein), wenn entweder die Bildelementgröße  $\Delta Y$  oder die Ortsfrequenz  $f_k$  gleich Null werden. Die Kontrastübertragungsfunktion wird Null (d.h. das Objektsignal wird ausgelöscht), wenn die Bildelementgröße  $\Delta Y$  der Wellenlänge  $l_k$  entspricht.

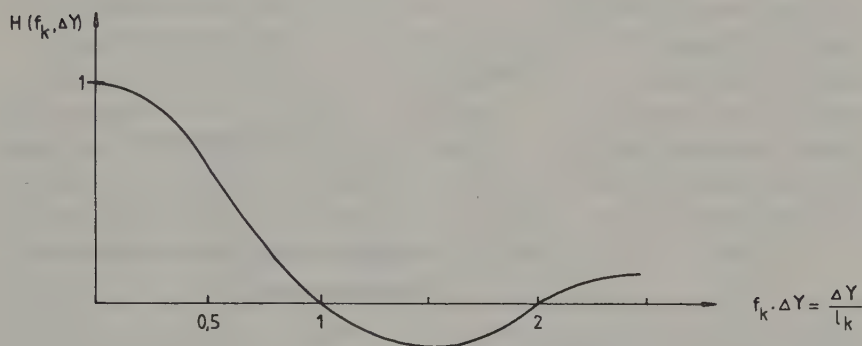


Bild 3.2-12: Kontrastübertragungsfunktion

Die Kontrastübertragungsfunktion  $H(f_k, \Delta Y)$  ist für den relevanten Teil im Bild 3.2-13 nochmals gezeichnet. Zusätzlich ist auch das geometrische Auflösungsvermögen (AV) eingetragen. Da das geometrische Auflösungsvermögen angibt, wie breit ein Streifenpaar mit unterschiedlicher Strahldichte sein muß, damit es vom Sensor gerade noch erkannt wird, liegt das (theoretische)

<sup>1</sup> Diese Kontrastübertragungsfunktion für einen Rotationsabtaster gilt allerdings nur unter der Voraussetzung, daß die Reaktionszeit des Detektors unendlich klein ist. Der Einfluß einer endlichen Reaktionszeit kann ebenfalls als Übertragungsfunktion formuliert werden. Beide Übertragungsfunktionen sind dann zu multiplizieren und ergeben eine neue, den Gesamtprozeß charakterisierende Übertragungsfunktion. Details entnehme man der Literatur (z.B. Hofmann, 1975).

Auflösungsvermögen geringfügig vor  $f_k \cdot \Delta Y = 1$  (Bild 3.2-13). Das tatsächliche geometrische Auflösungsvermögen, das unter anderem von der Qualität des Detektors und vom Objektkontrast abhängt, nimmt man etwa bei  $f_k \cdot \Delta Y \approx 0.7$  an, das entspricht - wie in der zweiten Abszissenachse im Bild 3.2-13 veranschaulicht - einer Breite des noch aufgelösten Streifenpaares unterschiedlicher Strahldichte von:

$$\underline{\text{Breite eines Streifenpaares} = 1.4 \Delta Y} \quad (3.2-14)$$

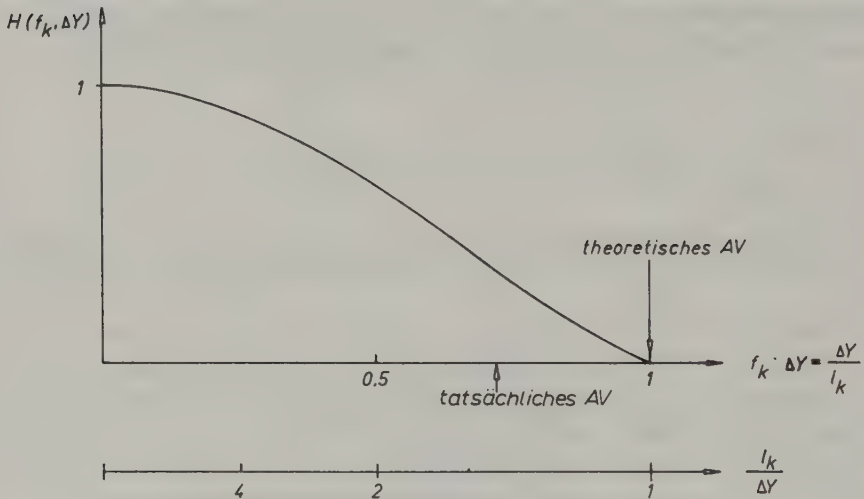


Bild 3.2-13: Kontrastübertragungsfunktion und geometrisches Auflösungsvermögen

Die Konstellation, die dem geometrischen Auflösungsvermögen entspricht, ist im Bild 3.2-14 auf der linken Seite für ein streifenartiges Objektmuster skizziert. Man sieht, daß es in jeder Position zu sogenannten Mischpixeln kommt. Die Bedingung für unverfälschte Bildelemente - wie im Bild 3.2-14 auf der rechten Seite skizziert - lautet dagegen bei einem streifenartigen Objektmuster:

$$\underline{\text{Breite eines Streifenpaares}} \quad \underline{\text{mit unverfälschten Bildelementen}} = 2.8 \Delta Y \quad (3.2-15)$$

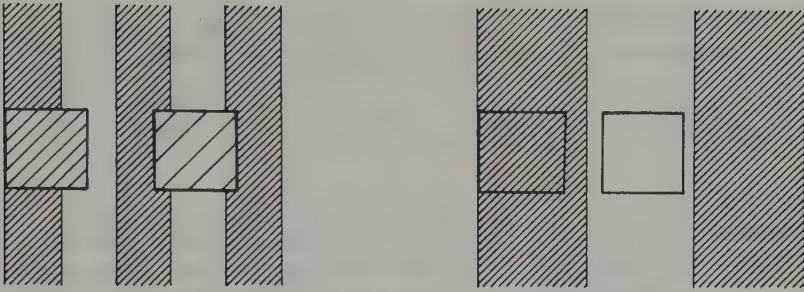


Bild 3.2-14: Geometrisches Auflösungsvermögen mit Mischpixeln (links) und unverfälschten Pixeln (rechts)

Wir wollen das geometrische Auflösungsvermögen eines Abtasters nicht mehr auf das Gelände beziehen, sondern auf ein Bild, das man aus den Daten der Abtastung herstellen kann. Damit bekommen wir auch den Vergleich des geometrischen Auflösungsvermögens eines Abtasters mit dem geometrischen Auflösungsvermögen eines photographischen Bildes. Wir stellen uns zu diesem Zweck das Abtasterbild im selben Format wie das photographische Meßbild (Bildbreite 23 cm) vor. Aus dieser Bildbreite und dem Gesamtöffnungswinkel  $2\alpha$  kann dann mit Hilfe der Beziehung (6.4-7) eine "fiktive Kammerkonstante"  $c$  des Abtasterbildes angegeben werden.

Substituiert man nun in (3.2-14) die Bildelementgröße  $\Delta Y$  durch (3.2-2) und führt man anstelle der Flughöhe  $h$  eine fiktive Kammerkonstante  $c$  ein, so ergibt sich für das "fiktive Bild" folgendes geometrisches Auflösungsvermögen (AV), das in Linienpaaren je Millimeter (lp/mm) ausgedrückt wird:

$$AV[lp/mm] = \frac{\cos^2 \alpha}{1.4 \cdot \Delta \alpha \cdot c [mm]} \quad (3.2-16)$$

Die entsprechende Gleichung zu (3.2-15) lautet:

$$AV \text{ mit unverfälschten Bildelementen } [lp/mm] = \frac{\cos^2 \alpha}{2.8 \cdot \Delta \alpha \cdot c [mm]} \quad (3.2-17)$$

Beispiele für das geometrische Auflösungsvermögen mit einer fiktiven Kammerkonstanten  $c = 123 \text{ mm}$  (diese Kammerkonstante folgt aus Gleichung (6.4-7), wenn man für das Scannerbild die bei den photographischen Meßkamern übliche Bildbreite von 23 cm annimmt):

a) Daedalus-Abtaster mit  $\Delta\alpha = 2.5 \text{ mrad}$  (Tab. 3.2-3):

$$\text{In Streifenmitte: } AV[1\text{p/mm}] = \frac{1}{1.4 \cdot 0.0025 \cdot 123} = 2.3 \text{ lp/mm}$$

$$\text{Am Streifenrand: } AV[1\text{p/mm}] = \frac{0.73^2}{1.4 \cdot 0.0025 \cdot 123} = 1.2 \text{ lp/mm}$$

Ergebnis: Die z.Z. verfügbaren Abtaster in Flugzeugen liefern ein geometrisches Auflösungsvermögen, das um Faktoren zwischen 10 und 100 schlechter ist als das entsprechende geometrische Auflösungsvermögen photographischer Bilder aus gleicher Flughöhe.

b) Im Erderkundungssatelliten LANDSAT gibt es einen Abtaster mit  $\Delta\alpha = 0.0425 \text{ mrad}$  (Tab. 4.2-14):

$$\text{In Streifenmitte: } AV[1\text{p/mm}] = \frac{1}{1.4 \cdot 0.0000425 \cdot 123} = 137 \text{ lp/mm}$$

Ergebnis: Scanneraufnahmen mit Satelliten erreichen photographische Qualität.

Hinweis: Das menschliche Auge erreicht in der deutlichen Sehweite ( $\hat{=} 25 \text{ cm}$ ) etwa 6 lp/mm.

Nun wenden wir uns der Frage der Digitalisierung des verfälschten Signales  $\bar{L}(Y)$  zu. Das Signal mit jener Wellenlänge, die dem geometrischen Auflösungsvermögen (3.2-14) entspricht, ist im Bild 3.2-15 skizziert, wobei für  $Y$  als Maßeinheit die Bildelementgröße  $\Delta Y$  herangezogen wurde. Das Abtasttheorem (C 3.4.2.1) besagt, daß das Digitalisierungsintervall kleiner als die halbe Länge der kürzesten Welle des zu digitalisierenden Signales gewählt werden muß, d.h.:

$\text{Digitalisierungsintervall} < \text{halbe Wellenlänge} = 0.7 \Delta Y$	(3.2-18)
--	----------

Im Bild 3.2-15 wurde ein geringfügig kleineres Digitalisierungsintervall als die halbe Wellenlänge eingezeichnet. Bei eingehaltenem Abtasttheorem ist man in der Lage, aus den digitalisierten Werten das kontinuierliche Signal durch Interpolation wieder fehlerfrei zu rekonstruieren (6.4.1 c).

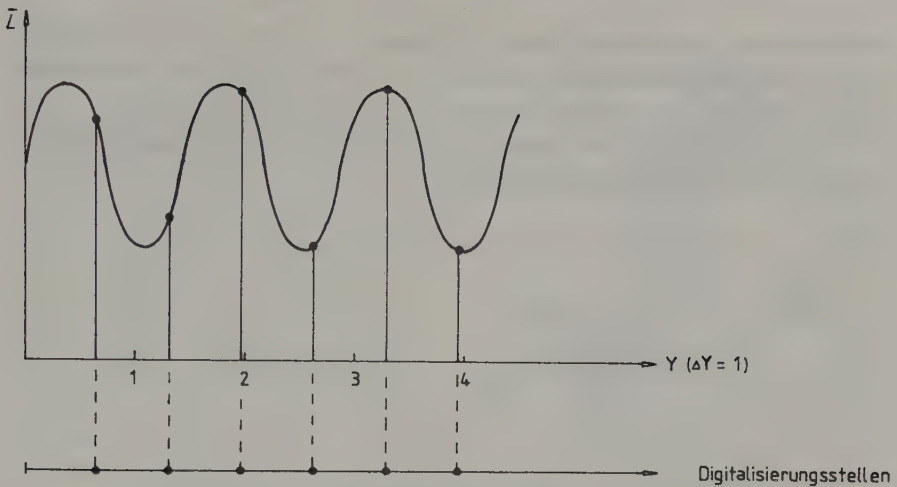


Bild 3.2-15: Signal, das dem geometrischen Auflösungsvermögen quer zur Flugrichtung entspricht, und Digitalisierungsstellen

Bisher haben wir uns nur mit der Abtastung in Y-Richtung, also quer zur Flugrichtung, befaßt. Wie sind die Verhältnisse in X-Richtung, also entlang der Flugrichtung (Bild 3.2-1) ? Für ein Bildelement mit der Ausdehnung  $\Delta X$  gelten die für  $\Delta Y$  abgeleiteten Beziehungen.<sup>1</sup> Es entsteht allerdings kein kontinuierliches Signal  $\bar{L}(X)$ , sondern es entstehen bereits während des Abtastvorganges diskrete Werte in Abständen von  $\Delta X$ , sofern sich die Zeilen nicht überlappen. Man kann in Flugrichtung deshalb von einer "Digitalisierung" mit dem Digitalisierungsintervall  $\Delta X$  sprechen. Das Signal mit jener Wellenlänge, das aufgrund des Abtasttheorems gerade noch rekonstruiert werden kann, ist im Bild 3.2-16 skizziert. (Die halbe Wellenlänge wurde etwas größer gewählt als das "Digitalisierungsintervall"  $\Delta X = 1$ .) Der Vergleich mit dem Bild 3.2-15 besagt, daß in Streifenmitte das Auflösungsvermögen in X-Richtung um den Faktor 1.4 schlechter als jenes in Y-Richtung sein muß.<sup>2</sup> Diese Aussage gilt bis zu einem Beobachtungswinkel von  $\pm 50$  gon. Mit Vergrößerung des Beobachtungswinkels  $\alpha$  nimmt das geometrische Auflös-

<sup>1</sup> Der Einfluß einer endlichen Reaktionszeit des Detektors entfällt aber in Flugrichtung (siehe Fußnote zu Gleichung (3.2-13)).

<sup>2</sup> Diese Aussage gilt nur dann, wenn in Streifenmitte die benachbarten Zeilen exakt nebeneinanderliegen. Mit einem gewissen "overscan" kann man die schlechtere Auflösung in X-Richtung teilweise kompensieren.

sungsvermögen in X-Richtung nämlich langsamer ab als jenes in Y-Richtung. Bei einem Beobachtungswinkel von  $\pm 50$  gon sind beide Größen schließlich gleich: Bei diesem Beobachtungswinkel ist - wie Bild 3.2-5 zeigt - die Bildelementgröße  $\Delta X$  um den Faktor 1.4 kleiner als die Bildelementgröße  $\Delta Y$ , sodaß sich dort beide Effekte aufheben.

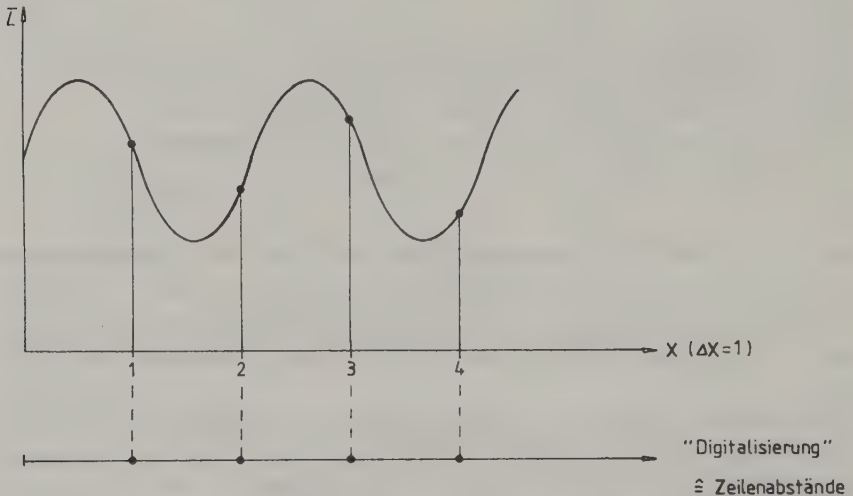


Bild 3.2-16: Signal, das durch die "Digitalisierung" in Flugrichtung gerade noch rekonstruiert werden kann

In einer Scanneraufnahme kann man aber noch Details erkennen, die beachtlich unter dem geometrischen Auflösungsvermögen liegen. Hier sind einmal die Anteile des periodischen Signales zu erwähnen, deren Wellenlängen kleiner als die Bildelemente sind. Wie aus der Übertragungsfunktion (Bild 3.2-12) hervorgeht, können diese Anteile noch sichtbar werden; allerdings nur dann, wenn das Signal/Rauschverhältnis des Detektors erheblich größer als Eins ist (3.2.1.5) und das Digitalisierungsintervall entsprechend klein gewählt wurde. Zum anderen sind noch Objektdetails zu erwähnen, die nicht in einem Streifenmuster angeordnet sondern als Objektpunkte (ein geschädigter Baum in einem gesunden Ensemble) oder als Objektlinie (Straße im Grünland) in einer monotonen Umgebung vorkommen. Man erkennt solche Objektdetails auch, wenn sie wesentlich kleiner als die Bildelemente sind. Voraussetzung ist aber, daß sie einen hohen Kontrast zur Umgebung aufweisen (Bild 3.2-17).



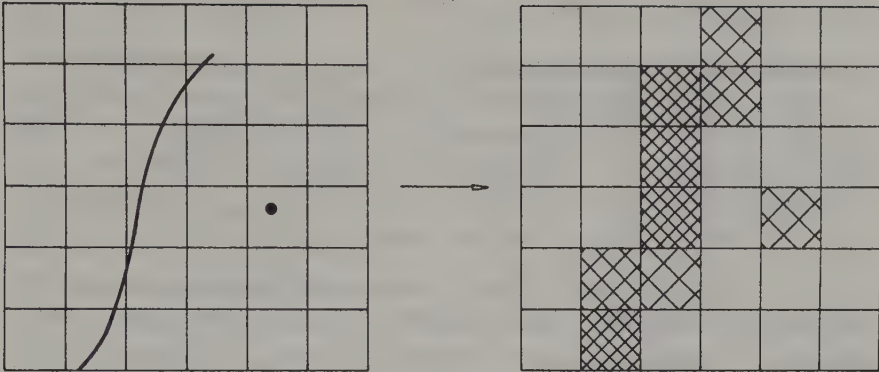


Bild 3.2-17: Detaillierkennbarkeit punkt- und linienförmiger Objekte in monotoner Umgebung

Zahlenbeispiel: Aus einer Flughöhe von 5000 m werden photographische Aufnahmen (mit einer RMK 15/23, geometrisches Auflösungsvermögen von 50 lp/mm für den gesamten photographischen Prozeß) und Scanneraufnahmen (mit einem Öffnungswinkel  $\Delta\alpha = 1.25$  mrad) gemacht. Man berechne die Breite eines noch erkennbaren Streifenpaares auf der Erdoberfläche.

$$\text{Bildelementgröße in Streifenmitte } \Delta X = \Delta Y = 5000 \cdot 0.00125 = 6.25 \text{ m} \quad (3.2-14)$$

$$\text{Streifenpaarbreite}_{\text{Abtaster}} = 1.4 \cdot 6.25 = 8.7 \text{ m}$$

$$\text{Streifenpaarbreite}_{\text{Photogr.}} = (1/50000) \cdot (5000/0.15) = 0.67 \text{ m}$$

Aufgabe 3.2-3: Der Rotationsabtaster in LANDSAT 1, 2 und 3 (4.2.2) hat eine Bildelementgröße von 80 m. Wie groß ist das Intervall bei der Digitalisierung des Analogsignals zu wählen?

Aufgabe 3.2-4: Wie groß ist die Kontrastminderung bei der Abtastung von Streifenpaaren, wenn die Streifenpaarbreite doppelt so groß ist wie das Bildelement?

Aufgabe 3.2-5: Aus einer Flughöhe von 7500 m werden photographische Aufnahmen (mit einer RMK 30/23, geometrisches Auflösungsvermögen 60 lp/mm für den gesamten photographischen Prozeß) und Scanneraufnahmen (mit einem Öffnungswinkel  $\Delta\alpha = 1.25$  mrad) gemacht. Wie groß ist die Breite eines noch erkennbaren Streifenpaares auf der Erdoberfläche? Zusatzaufgabe: Wie breit müssen die Streifenpaare bei der Scanneraufnahme auf der Erdoberfläche mindestens sein, damit auch unverfälschte Bildelemente auftreten?

### 3.2.1.3 Charakterisierung von Detektorsystemen

Die Leistungsfähigkeit eines Abtasters hängt vor allem von den Detektoren ab. Es werden sogenannte Quantendetektoren verwendet, bei denen Photonen (siehe Kapitel 2.2) in direkter Wechselwirkung mit den Elektronen im Detek-

tormaterial freie Ladungsträger produzieren, die dann einen meßbaren Strom oder eine meßbare Spannung hervorrufen.

Im Sichtbaren und im nahen Infrarot setzt man z.T. Quantendetektoren ein, die nach dem äußeren photoelektrischen Effekt arbeiten: Die Photonen sind in diesem Spektralbereich so energiereich, daß sie Elektronen aus einem Material (Photokatode) "herausschlagen" können. Der entstehende Strom freier Elektronen wird dann verstärkt ("Photomultiplier", "Sekundärelektronenvervielfacher"), sodaß ein meßbares Detektorsignal entsteht.

Quantendetektoren nach dem Prinzip des inneren photoelektrischen Effektes können nicht nur im Sichtbaren und im nahen Infrarot, sondern auch im mittleren und im thermischen Infrarot eingesetzt werden. Hier lösen die auftreffenden Photonen die Elektronen aus ihren Bindungen im Halbleiter-Detektormaterial nur so weit heraus, daß sie sich im Halbleiter frei bewegen können. Je nach der genaueren Wirkungsweise unterscheidet man Photodioden, Photoleiter und Photoelemente.

Ein Detektor wird vor allem durch seine spektrale Empfindlichkeit, seine Rauscheigenschaften und seine Reaktionszeit gekennzeichnet.

Die Empfindlichkeit  $R$  eines Detektors ist definiert als

$$R = \frac{U}{\Phi} [V \cdot W^{-1}], \quad (3.2-19)$$

wobei  $U$  die vom Detektor gelieferte Spannung (Spannungsänderung) in Volt und  $\Phi$  der auftreffende Strahlungsfluß in Watt ist.  $R$  sollte im Idealfall eine Konstante unabhängig von  $\Phi$  sein, d.h.  $U$  sollte linear mit  $\Phi$  ansteigen. Man spricht dann von einem linearen Detektor.  $R(\lambda)$  als Funktion der Wellenlänge heißt spektrale Empfindlichkeit.

Die Empfindlichkeit allein sagt nichts über die Brauchbarkeit eines Detektors zum Nachweis kleiner Strahlungsleistungen aus: Jedes Detektorsignal ist von statistischen Schwankungen ("Rauschen") überlagert, die eine gewisse Unsicherheit  $\Delta U$  des gemessenen Spannungswertes verursachen. Dem entspricht gemäß (3.2-19) eine Unsicherheit  $\Delta \Phi = \Delta U/R$  des zu ermittelnden Strahlungsflusses. Diese Größe  $\Delta \Phi$  heißt "rauschäquivalente Strahlungsleistung" (noise equivalent power, NEP) und gibt die kleinste noch nachweisbare Strahlungsleistung bzw. Strahlungsleistungsdifferenz an.

Das Verhältnis des Strahlungsflusses bzw. der Strahlungsflußänderung des interessierenden Signals,  $\Phi_s$ , zur rauschäquivalenten Strahlungsleistung

heißt "Signal/Rauschverhältnis"  $\hat{S}/NEP$ , kürzer S/N. Es soll bei jeder Messung größer als Eins sein.

Die rauschäquivalente Strahlungsleistung muß im Zusammenhang mit der Reaktionszeit des Detektors gesehen werden. Dazu verwendet man am besten den Begriff der "Bandbreite": Jedes zeitabhängiges Signal (z.B. das von einem Detektor gelieferte Spannungssignal  $U(t)$ ) kann als Summe harmonischer Komponenten verschiedener Frequenzen  $f_k$  gedacht werden (Fourierreihe).

Eine solche Fourierreihe haben wir mit den Gleichungen (3.2-6) und (3.2-7) bereits kennengelernt. Allerdings wurde dort die Fourierreihe als Funktion der sogenannten Ortsfrequenzen  $f_k$  angeschrieben. In diesem Abschnitt benötigen wir die Fourierreihe in Abhängigkeit von Zeitfrequenzen. Ortsfrequenz und Zeitfrequenz können durch folgende Überlegungen gegeneinander ausgetauscht werden: Gemäß Gleichung (3.2-13) und Bild 3.2-12 hat die Kontrastübertragungsfunktion bei  $f_k \cdot \Delta Y = 1$  zwar die erste Nullstelle (alle höheren Ortsfrequenzen werden ohnehin vernachlässigt), doch beschränkt man sich - ähnlich wie bei der Definition des geometrischen Auflösungsvermögens (Bild 3.2-12) - auf einen kleineren Teil der Übertragungsfunktion. Nimmt man  $f_k \cdot \Delta Y = 0.5$ , so kann

$$f_{\max} = \frac{1}{2 \cdot \Delta Y} \quad (3.2-20)$$

als höchste vorkommende Ortsfrequenz angesehen werden. Ihr entspricht eine Zeitfrequenz

$$f_{\max} = \frac{1}{2 \cdot \Delta t} \quad (3.2-21)$$

des abgetasteten Signals, wobei  $\Delta t$  jene Zeitspanne darstellt, die zur Abtastung der Wegstrecke  $\Delta Y$  ( $\hat{=}$  Bildelementgröße) innerhalb der abgetasteten Zeile benötigt wird.

Der Abtaster benötigt für eine volle Umdrehung (d.h. für eine Drehung um den Winkel  $2\pi$ ) die Zeit  $1/\nu$  ( $\nu \hat{=}$  Abtastfrequenz). Für eine Drehung um den Winkel  $\Delta\alpha$  ( $\hat{=}$  Öffnungswinkel), d.h. für die Abtastung der Strecke  $\Delta Y$ , benötigt der abtastende Spiegel daher die Zeit:

$$\Delta t = \frac{1}{\nu} \cdot \frac{\Delta\alpha}{2\pi} \quad (3.2-22)$$

Damit ergibt sich die maximale Zeitfrequenz  $f_{\max}$  aus Gleichung (3.2-21):

$$f_{\max} = \frac{v \cdot \pi}{\Delta \alpha} \quad (3.2-23)$$

Nun können wir die Bandbreite erklären: Ein sich zeitlich nur langsam veränderndes Signal enthält nur niedrige Frequenzen, während ein Signal mit raschen, "sprunghaften" zeitlichen Änderungen auch hochfrequente Anteile enthält. Der gesamte Frequenzbereich der harmonischen Komponenten eines Signals ist die "Bandbreite" des Signals:

$$\Delta f = f_{\max} - f_{\min} \quad (3.2-24)$$

wobei  $f_{\max}$  und  $f_{\min}$  die obere und die untere Grenzfrequenz bezeichnen. Die uns hier interessierenden Signale können auch einen zeitlich konstanten Anteil ( $L_0$  in (3.2-6)) enthalten, d.h.  $f_{\min} = 0$ . Damit wird die Bandbreite  $\Delta f$ :

$$\Delta f = f_{\max} \quad (3.2-25)$$

Jedes Detektorsystem - bestehend aus Detektor und nachgeschaltetem Verstärker - kann nur Signale eines bestimmten Frequenzbereiches erfassen: Das Detektorsystem ist durch eine Bandbreite (bzw. Maximalfrequenz gemäß (3.2-25)) gekennzeichnet. Signale mit zu hohen Frequenzanteilen (zu rasch wechselnde Strahlungsänderungen) werden "verschmiert"; die Frequenzen  $f > f_{\max}$  werden unterdrückt. Die Bandbreite (Maximalfrequenz) des Detektorsystems sollte nach diesen Überlegungen nicht kleiner als  $f_{\max}$  gemäß Gleichung (3.2-23) sein, da ansonsten relevante Frequenzanteile des Abtaster-signals unterdrückt werden und das Auflösungsvermögen in Y-Richtung daher vermindert würde.

Das Rauschen enthält Komponenten aller Frequenzen. Unterdrückt ein Detektorsystem die hohen Frequenzen, so unterdrückt es auch einen Teil des Rauschens. Das im Detektorsignal enthaltene Rauschen, insbesondere die rausch-äquivalente Strahlungsleistung NEP, nimmt daher mit der Bandbreite des Detektorsystems zu. Deshalb sollte die Bandbreite des Detektorsystems auch nicht größer als unbedingt notwendig (Gleichung 3.2-23) sein !

In Theoriebüchern zu Festkörperdetektoren findet man die grundlegende Beziehung (Manual of Remote Sensing, 1983):

$$NEP = k \sqrt{F_D} \sqrt{\Delta f},$$

(3.2-26)

wobei  $F_D$  die Fläche des Detektors und  $k$  ein das Rauschverhalten des Detek-

tormaterials kennzeichnender Proportionalitätsfaktor ist. Meistens wird der Kehrwert

$$\frac{1}{k} = D^* = \frac{\sqrt{F_D} \sqrt{\Delta f}}{NEP} \quad (3.2-27)$$

(Detektivität, englisch "detectivity D-star") als Gütezahl des Detektormaterials angegeben.  $D^*$  ist - wie aus dem Bild 3.2-18 ersichtlich - eine Funktion der Wellenlänge der Strahlung, aber auch sonstiger Meßbedingungen. Insbesondere ist das Rauschen ein teilweise thermisch bedingtes Phänomen, weshalb es temperaturabhängig ist. Das Rauschen eines Detektors kann durch Kühlen stark verringert werden;  $D^*$  nimmt mit sinkender Detektortemperatur zu. Detektoren im Sichtbaren, im nahen und im mittleren Infrarot können oft ohne Kühlung betrieben werden. Im thermischen Infrarot ist im allgemeinen eine Kühlung auf die Temperatur flüssigen Stickstoffs (77 K = -196 °C) notwendig.

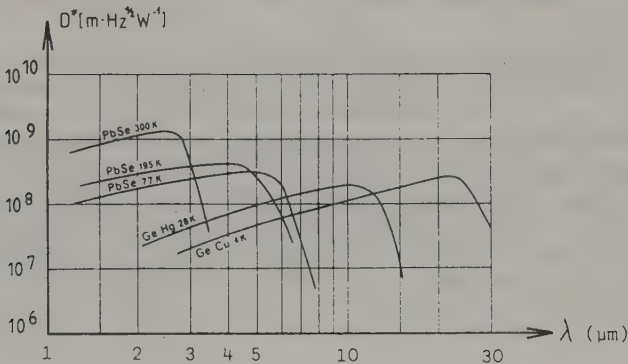


Bild 3.2-18: Detektivität  $D^*$  von Detektoren aus unterschiedlichem Material (Cu  $\hat{=}$  Kupfer, Ge  $\hat{=}$  Germanium, Hg  $\hat{=}$  Quecksilber, Pb  $\hat{=}$  Blei, Se  $\hat{=}$  Selen) und Betriebstemperatur (in Kelvin) in Abhängigkeit von der Wellenlänge der absorbierten Strahlung (Albertz/Kreiling, 1980)

**Beispiel:** Ein Abtaster enthält einen Detektor der Größe 0.5 mm im Quadrat, dessen Rauscheigenschaften durch  $D^* = 10^9 \text{ m} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$  beschrieben werden. Die den Detektor nachgeschaltete Elektronik begrenze die Bandbreite auf 50 kHz. Gesucht ist die rauschäquivalente Strahlungsleistung NEP sowie das Signal/Rauschverhältnis, wenn ein Nutzsignal von 30 nW auf den Detektor fällt.



$$(3.2-27): \text{NEP} = \frac{\sqrt{F_D} \sqrt{\Delta f}}{D^*} = \frac{5 \cdot 10^{-4} \text{ m} \sqrt{5 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}}}{10^9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1/2} \text{ W}^{-1}} = 1.118 \cdot 10^{-10} \text{ W} = 0.1118 \text{ nW}$$

$$S/N = \frac{30 \text{ nW}}{0.1118 \text{ nW}} = 268.$$

Das Signal ist also 268mal größer als das Rauschen und kann daher sehr genau gemessen werden.

Das Rauschen des Detektors begrenzt die radiometrische Auflösung eines Abtasters, d.h. die kleinste meßbare Strahldichtedifferenz. Bei Abtastern im Sichtbaren, im nahen und im mittleren Infrarot, wo von der Geländeoberfläche reflektierte Strahlung gemessen wird, interessiert den Anwender in diesem Zusammenhang vor allem die kleinste meßbare Änderung des (gerichteten) Reflexionsgrades  $\text{NE}\Delta\rho_r$  (noise equivalent reflectance change, rauschäquivalente Reflexionsgradänderung). Im thermischen Infrarot bestimmt die radiometrische Auflösung die Temperaturauflösung, d.h. die kleinste meßbare Änderung der Geländeoberflächentemperatur,  $\text{NE}\Delta T$  (noise equivalent temperature change, rauschäquivalente Temperaturänderung). Im Kapitel 3.2.1.5 werden wir sehen, wie diese Kenngrößen mit  $D^*$  sowie anderen Abtasterparametern zusammenhängen.

Für drei Abtaster der Fa. Daedalus sind in der Tab. 3.2-19 die Spektralbereiche angegeben. Die Tab. 3.2-19 ist eine Ergänzung zu den technischen Angaben der Tab. 3.2-3. Für den Daedalus AADS1268 ist die rauschäquivalente Reflexionsänderung  $\text{NE}\Delta\rho_r$  bzw. die rauschäquivalente Temperaturänderung  $\text{NE}\Delta T$  angegeben, und zwar für einen Öffnungswinkel  $\Delta\alpha = 2.5 \text{ mrad}$  und für die beiden Abtastfrequenzen  $\nu = 12.5 \text{ Zeilen/s}$  und  $\nu = 50 \text{ Zeilen/s}$ . Die dazugehörigen beiden Bandbreiten betragen laut (3.2-23) und (3.2-25):  $\Delta f = 15.7$  bzw.  $62.8 \text{ kHz}$ . Aus der Gleichung (3.2-26) läßt sich ablesen, daß sich deshalb die rauschäquivalenten Reflexionsänderungen bzw. die rauschäquivalenten Temperaturänderungen der beiden verschiedenen Abtastraten wie 1:2 verhalten müssen.



AADS1268

Spektralbereich [ $\mu\text{m}$ ]	12.5 Zeilen/s $\text{NE}\Delta\rho_r$ [ % ]	50 Zeilen/s $\text{NE}\Delta\rho_r$ [ % ]
0.42-0.45	0.5	1.0
0.45-0.52	0.1	0.2
0.52-0.60	0.05	0.15
0.60-0.63	0.15	0.2
0.63-0.69	0.06	0.1
0.69-0.75	0.2	0.2
0.76-0.90	0.1	0.2
0.91-1.05	0.3	0.5
1.55-1.75	0.3	0.7
2.08-2.35	0.3	0.7
	$\text{NE}\Delta T$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$\text{NE}\Delta T$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]
8.5-13	0.2	0.3

AA3500

Spektralbereich [ $\mu\text{m}$ ]
0.32-0.38
0.40-1.1
3.0- 5.5
8.5-12.5

AADS1285 ( $\Delta\alpha = 2.5 \text{ mrad}$ )

Spektralbereich [ $\mu\text{m}$ ]
8.2-8.6
8.6-9.0
9.0-9.4
9.4-10.2
10.2-11.2
11.2-12.2

Tab. 3.2-19: Angaben über die Spektralbereiche und die rauschäquivalenten Reflexionsänderungen bzw. rauschäquivalenten Temperaturänderungen für Daedalus-Abtaster (siehe auch Tab. 3.2-3; beim AA3500 sind bei der Aufnahme von den 4 Spektralbereichen 2 auszuwählen)

**Aufgabe 3.2-6:** Mit welchem Spektralbereich muß mit dem Daedalus-Abtaster AA3500 (Tab. 3.2-21) gearbeitet werden, wenn Waldbrände, die etwa eine Temperatur von  $300^{\circ}\text{C}$  haben, aufgenommen werden sollen ?

**Zusatzaufgabe:** In welchen Spektralbereich eines Daedalus-Abtasters AADS1268 (Tab. 3.2-21) wird sich ein brennendes Atomkraftwerk, das Temperaturen bis  $2500^{\circ}\text{C}$  erreicht, sehr stark abzeichnen ?

**Aufgabe 3.2-7:** Man wiederhole das Zahlenbeispiel unter der Annahme, daß die Detektorfläche nicht quadratisch, sondern kreisförmig mit einem Radius von  $0.25 \text{ mm}$  ist.

**Aufgabe 3.2-8:** Man wiederhole das Zahlenbeispiel unter der Annahme, daß die Detektivität des Detektors nur  $D^* = 10^8 \text{ m}\cdot\text{Hz}^{1/2}\text{W}^{-1}$  beträgt (im Bild 3.2-18 ist die unterschiedliche Detektivität der Detektoren in Abhängigkeit vom Material angegeben).

**Aufgabe 3.2-9:** Wie ändern sich die in der Tab. 3.2-19 angegebenen rauschäquivalenten Reflexionsänderungen  $\text{NE}\Delta\rho_r$ , wenn anstatt mit einem Öffnungswinkel von  $2.5 \text{ mrad}$  mit einem Öffnungswinkel von  $1.25 \text{ mrad}$  geflogen wird.

**Aufgabe 3.2-10:** Welchen Einfluß hat die Flughöhe auf die rauschäquivalente Reflexionsänderung  $\text{NE}\Delta\rho_r$  ?

#### 3.2.1.4 Der Abtaster als Strahlungsmesser

Mit dem Rotationsabtaster kann sowohl die an der Erdoberfläche reflektierte Sonnenstrahlung als auch die von der Erdoberfläche emittierte Thermalstrahlung aufgenommen werden. Im Bild 3.2-20 ist die spektrale spezifische Ausstrahlung  $M_\lambda$  dieser beiden Strahlungsarten gegenübergestellt. Die Kurve für die reflektierte Sonnenstrahlung wurde aus dem Bild 2.6-1 entnommen, wobei allerdings von der Strahldichte  $L$  durch Multiplikation mit  $\pi$  auf die spezifische Ausstrahlung  $M$  übergegangen und ein Reflexionsgrad  $\rho = 1$  unterstellt wurde. Die Absorption der Atmosphäre ist nicht berücksichtigt. Die Kurve für die emittierte Strahlung wurde mit dem Planckschen Strahlungsgesetz (2.6-2) für  $T = 300 \text{ K}$  berechnet. Der Emissionsgrad  $\epsilon$  (2.6-4) wurde Eins gesetzt. Die Strahldichte  $L$  des Planckschen Strahlungsgesetzes wurde durch Multiplikation mit  $\pi$  in die spezifische Ausstrahlung  $M$  umgerechnet (Lambertsche Strahlungscharakteristik eines schwarzen Körpers).

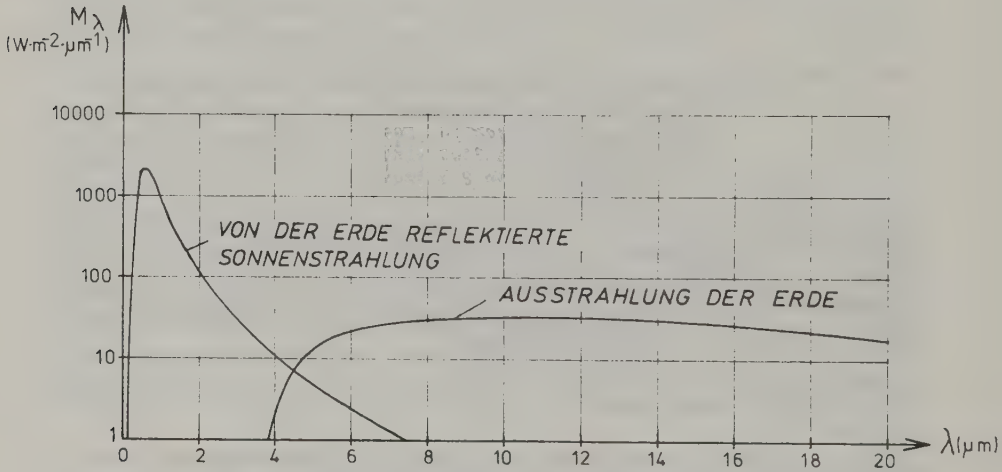


Bild 3.2-20: Spektrale spezifische Ausstrahlung  $M_\lambda$  der reflektierten Sonnenstrahlung (Flächenelement senkrecht zur Sonnenstrahlung,  $\rho = 1$ , Vernachlässigung der Atmosphäre bei der Sonneneinstrahlung) und der emittierten Strahlung ( $T = 300 \text{ K}$ ,  $\epsilon = 1$ ).

Das Bild 3.2-20 führt zu der Erkenntnis, daß mit den Detektoren, die im sichtbaren Licht und im nahen Infrarotbereich empfindlich sind, nahezu nur reflektierte Sonnenstrahlung erfaßt wird. Mit den Thermaldetektoren, die etwa zwischen 6 und 14  $\mu\text{m}$  empfindlich sind, erfassen wir dagegen nahezu

keine Sonnenstrahlung sondern nur emittierte Strahlung der Erdoberfläche. Die emittierte Strahlung ist etwa um zwei Größenordnungen geringer als die reflektierte Strahlung.

Die Strahlungsmessung im Sichtbaren und im nahen Infrarot läuft im wesentlichen nach den Gesetzmäßigkeiten ab, die wir bei der Photographie (3.1.1.3) bereits kennengelernt haben. Die Gleichung (3.1-13) gilt daher auch für den Abtaster, wobei  $\alpha = 0^\circ$  gesetzt werden kann, da die Detektorfläche  $F_D$  klein im Vergleich zur Brennweite  $f$  ist, sodaß nur achsnaher Strahlen vorkommen. Für den auf die Detektorfläche  $F_D$  auftreffenden Strahlungsfluß erhalten wir somit:

$$\dot{Q}_D = F_D \cdot E_D = \frac{d_0^2 \cdot F_D \cdot \tau_0 \cdot \pi \cdot L_G}{4 \cdot f^2} \quad (3.2-28)$$

Unter Verwendung der Beziehung (3.1-14) und unter Beachtung, daß  $F_D = d_D^2 = (f \cdot \Delta\alpha)^2$  ist, ergibt sich:

$$\dot{Q}_D = \frac{d_0^2 (\Delta\alpha)^2 \tau_0 \cdot \rho_r \cdot E_G}{4} \quad (3.2-29)$$

$E_D$   $\hat{=}$  Bestrahlungsstärke des Detektors.

$\Delta\alpha$   $\hat{=}$  Öffnungswinkel, der sich aus  $\Delta\alpha = d_D/f$  ergibt.

$d_0$   $\hat{=}$  Durchmesser der Öffnung des abbildenden optischen Systems des Abtasters (z.B. des Teleskopes im Bild 3.2-2).

$\tau_0$   $\hat{=}$  Transmissionsgrad des optischen Systems des Abtasters.

$f$   $\hat{=}$  Brennweite des optischen Systems des Abtasters.

$L_G$   $\hat{=}$  Strahldichte der von der Geländeoberfläche abgehenden Strahlung.

$\rho_r$   $\hat{=}$  Gerichteter Reflexionsgrad der Geländeoberfläche.

$E_G$   $\hat{=}$  Bestrahlungsstärke der auf die Geländeoberfläche treffenden Strahlung.

Die bei der Besprechung der Photographie angegebene Fortsetzung der Überlegungen gilt sinngemäß auch für den Abtaster, insbesondere die Gleichung (3.1-15) für den Einfluß der Atmosphäre und die Gleichung (3.1-18) für den Einfluß der spektralen Transmission  $\tau(\lambda)$  der im Abtaster benutzten optischen Teile (z.B. das Prisma im Bild 3.2-2) sowie eine zur Gleichung (3.1-23) analoge Beziehung zur Berücksichtigung der spektralen Empfindlichkeit der jeweiligen Detektoren.

Beispiel: Ein Abtaster ist mit einem quadratischen Detektor, dessen Seitenlänge 0.5 mm beträgt, bestückt. Die abbildende Optik habe den Durchmesser  $d_0 = 8.3$  cm, die Brennweite  $f = 33.3$  cm, der Transmissionsgrad  $\tau_0$  des optischen Systems sei 60%.

Man berechne a) den Öffnungswinkel  $\Delta\alpha$  und b) den auf den Detektor fallenden Strahlungsfluß in einem Wellenlängenbereich von 0.53 bis 0.58  $\mu\text{m}$ , wenn der Abtaster den im Beispiel des Abschnittes 2.3 beschriebenen Acker ( $E_{G,\lambda=0.55\mu\text{m}} = 1423 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ ,  $\rho_r(\lambda = 0.55 \mu\text{m}) = 15\%$ ) aufnimmt.

Lösung: a)  $\Delta\alpha = 0.5/333 = 0.0015 = 1.5 \text{ mrad}$

b)  $\Phi_D = d_0^2 (\Delta\alpha)^2 \tau_0 \cdot \rho_r \cdot E_{G\lambda} \cdot \Delta\lambda / 4 = 2.49 \cdot 10^{-8} \text{ W} = 24.9 \text{ nW}$

Die Strahlungsmessung im Thermalbereich kann nur mit Rotationsabtastern durchgeführt und soll daher im folgenden etwas vollständiger beschrieben werden: Es gilt auch für die Messung der emittierten Strahlung die Grundgleichung (3.2-28). Allerdings ist die Strahldichte  $L_G$  unter Benutzung der Gleichung (2.6-4) wie folgt zu ersetzen:

$$L_G = \int_{\lambda=\lambda_1}^{\lambda_2} L_{SK,\lambda}(T) \cdot \epsilon(\lambda) \cdot d\lambda \quad (3.2-30)$$

$L_{SK,\lambda}(T) \hat{=}$  spektrale Strahldichte des schwarzen Körpers mit jener Temperatur, die die Erde innerhalb des jeweiligen Bildelementes hat. Sie gehorcht dem Planckschen Strahlungsgesetz (2.6-2).

$\epsilon(\lambda) \hat{=}$  spektraler Emissionsgrad, der dem Absorptionsgrad  $\alpha(\lambda)$  entspricht und den Reflexionsgrad  $\rho(\lambda)$  auf Eins ergänzt (2.6-4).

$\lambda_2 - \lambda_1 \hat{=}$  Spektralbereich des jeweiligen Detektors.

Abgesehen von den Systemparametern ( $d_0$ ,  $\tau_0$ ,  $\Delta\alpha$  oder  $F_D$ ,  $f$ ) ist die Bestrahlungsstärke  $E_D$  vom Emissionsgrad  $\epsilon$  und von der Temperatur  $T$  des abgetasteten Objekts abhängig (siehe Gleichungen (3.2-28) und (3.2-30)). Aus dem gemessenen Strahlungswert  $E_D$  kann man deshalb nur dann die Temperatur  $T$  ableiten, wenn der Emissionsgrad  $\epsilon$  bekannt ist.

Wir gehen zunächst davon aus, daß näherungsweise  $\epsilon = 1$  angenommen und der Einfluß der Atmosphäre vernachlässigt werden kann. Im Abtaster sind zwei Referenzstrahler (schwarze Körper<sup>1</sup> mit bekannter Temperatur) eingebaut. Diese Referenzstrahler sind in der Regel oberhalb des rotierenden Prismas (Bild 3.2-1 und 3.2-2) angeordnet und werden bei jeder Umdrehung des Pris-

<sup>1</sup> In Satelliten verwendet man auch die (bekannte) Hintergrundstrahlung des Weltalls als Referenzstrahler.

mas abgetastet. Beim Daedalus AADS1268 (Tab. 3.2-3) können die Referenzstrahler zwischen -15 °C und +50 °C eingestellt werden. Bei linearer Interpolation<sup>1</sup> ergibt sich die Temperatur  $T_G$  des Geländeelementes aus dem gemessenen elektrischen Signal  $S_G$  des Geländeelementes und den gemessenen elektrischen Signalen der beiden Referenzstrahler  $S_{R1}$  und  $S_{R2}$  sowie den bekannten Temperaturwerten der Referenzstrahler  $T_{R1}$  und  $T_{R2}$ :

$$T_G = T_{R1} + \frac{T_{R2} - T_{R1}}{S_{R2} - S_{R1}} (S_G - S_{R1}) \quad (3.2-31)$$

Diese (rohen) Temperaturwerte  $T_G$  sind für viele Anwendungen bereits unmittelbar verwendbar, insbesondere dann, wenn nur Temperaturdifferenzen gefragt sind.

Ein bekannter Emissionsgrad  $\epsilon < 1$  kann (näherungsweise) unter Verwendung von Gleichung (2.6-5) berücksichtigt werden. Für eine exakte Lösung (allerdings ohne Berücksichtigung der atmosphärischen Einflüsse - siehe unten) sind die Gleichungen (2.6-2) und (2.6-3) heranzuziehen.

Der Einfluß der Atmosphäre auf die mit einem Abtaster gemessene Thermalstrahlung ist ein mehrfacher:

- Die von der Geländeoberfläche emittierte Strahlung wird auf ihrem Weg zum Abtaster in der Höhe  $h$  von der Atmosphäre zum Teil absorbiert, d.h. der Transmissionsgrad der Atmosphäre  $\tau_A(\lambda, h, \theta) < 1$  ist zu berücksichtigen. Für die  $\theta$ -Abhängigkeit gilt dabei die Gleichung (2.7-14).
- Die Atmosphäre selbst emittiert Thermalstrahlung. Das Emissionsvermögen der Atmosphäre ist gemäß Gleichung (2.6-4a) umso größer, je kleiner ihr Transmissionsgrad ist. Emissionsvermögen und Transmissionsgrad der Atmosphäre sind im wesentlichen vom (konstanten) Kohlendioxidgehalt und vom (variablen) Wasserdampfgehalt bestimmt. Eine Atmosphäre hat man sich - in einem einfachen Atmosphärenmodell - in horizontale Schichten unterteilt vorzustellen, wobei jede Schicht entsprechend ihrer Temperatur und entsprechend ihrem von der Feuchte abhängigen Emissionsgrad Strahlung emittiert, die von den anderen Schichten entsprechend deren von der

<sup>1</sup> Die lineare Interpolation ist - zumindest wenn die beiden Referenzstrahler ein großes Intervall überbrücken - durch eine Interpolation höherer Ordnung zu ersetzen, die den Funktionsverlauf des Planckschen Strahlungsgesetzes (2.6-2) berücksichtigt. Ist z.B. der eine Referenzstrahler auf +10 °C und der andere auf +50 °C eingestellt, liefert die lineare Interpolation in der Mitte einen Fehler von fast 2 °C.  
Aufgabe 3.2-11: Man verifiziere diese Aussage mit Hilfe des Planckschen Strahlungsgesetzes.



Feuchte abhängigen Transmissionsgrad zum Teil absorbiert werden. Insgesamt verursacht diese Thermalstrahlung der Atmosphäre eine spektrale Bestrahlungsstärke  $E_{GH,\lambda}$  der Geländeoberfläche (Himmelsstrahlung, "Gegenstrahlung"). Die Geländeoberfläche reflektiert diese Strahlung mit dem Reflexionsgrad  $1 - \epsilon$  nach oben zum Abtaster.

- Die Atmosphäre emittiert Thermalstrahlung auch direkt nach oben zum Abtaster. Die spektrale Strahldichte dieser Strahlung werde mit  $L_{L,\lambda}(h, \theta)$  bezeichnet.

In Anlehnung an die Gleichungen (3.1-15) und (3.2-28) erhält man damit für die Bestrahlungsstärke  $E_D$  des Abtaster-Detektors durch Thermalstrahlung unter Berücksichtigung der Atmosphäre:

$$E_D = \frac{d_0^2 \pi}{4 \cdot f^2} \int_{\lambda=\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_O(\lambda) \left[ \left( \epsilon(\lambda) \cdot L_{SK,\lambda}(T_G) + (1 - \epsilon(\lambda)) \frac{E_{GH,\lambda}}{\pi} \right) \left( \tau_A(\lambda, h, \theta=0) \right)^{\frac{1}{\cos \alpha}} + L_{L,\lambda}(h, \theta=\alpha) \right] d\lambda$$

(3.2-32)

- $\alpha$   $\hat{=}$  Nadirwinkel, unter dem das jeweilige Bildelement aufgenommen wird (Bild 3.2-1).
- $\tau_O(\lambda)$   $\hat{=}$  Spektraler Transmissionsgrad des optischen Systems des Abtasters.
- $\epsilon(\lambda)$   $\hat{=}$  Emissionsgrad der Geländeoberfläche.
- $T_G$   $\hat{=}$  Temperatur der Geländeoberfläche.
- $E_{GH,\lambda}$   $\hat{=}$  Spektrale Bestrahlungsstärke der Geländeoberfläche durch Himmelsstrahlung (Gegenstrahlung) - abhängig von vertikaler Temperaturverteilung und Feuchteverteilung in der Atmosphäre.
- $\tau_A(\lambda, h, \theta=0)$   $\hat{=}$  Spektraler Transmissionsgrad der Atmosphäre von der Geländeoberfläche bis zur Höhe  $h$  bei lotrechtem Strahlungspfad. Im thermischen Infrarot ist dieser Transmissionsgrad glücklicherweise sehr groß (Bild 2.7-1).
- $L_{L,\lambda}(h, \alpha)$   $\hat{=}$  Spektrale Strahldichte der Atmosphäre in der Höhe  $h$  in Richtung vom Geländeelement zum Abtaster - abhängig von vertikaler Temperaturverteilung und Feuchteverteilung in der Atmosphäre.



Bei einem Vergleich von (3.2-32) mit (3.1-15) ist zu beachten, daß die Größen  $E_{GH,\lambda}$  und  $L_{L,\lambda}$  in (3.2-32) die von der Atmosphäre emittierte Strahlung beschreiben, während es sich bei  $E_{GH}$  und  $L_L$  in (3.1-15) um in der Atmosphäre gestreute Sonnenstrahlung handelt.

Der zweite Term in Gleichung (3.2-32), der die von der Geländeoberfläche nach oben reflektierte Himmelsstrahlung beschreibt, ist wegen des meist kleinen Reflexionsgrades  $1-\epsilon(\lambda)$  der Geländeoberfläche manchmal zu vernachlässigen.

Die für die Berücksichtigung der atmosphärischen Einflüsse gemäß (3.2-32) benötigten Größen  $\tau_A(\lambda, h, \theta)$ ,  $L_{L,\lambda}(h, \alpha)$  und eventuell auch  $E_{GH,\lambda}$  können mit einem Atmosphärenmodell ermittelt werden. Als Eingangsdaten (Meßdaten) für das Atmosphärenmodell dienen dabei Temperaturdaten und Feuchtedaten.

Zahlenbeispiel: Der Thermaldetektor eines Abtasters ist zwischen  $\lambda_1 = 8.5 \mu\text{m}$  und  $\lambda_2 = 10.5 \mu\text{m}$  sensibilisiert. Die Geländeoberfläche, die eine Temperatur von  $T_G = 26.8^\circ\text{C}$  besitzt, wird aus 2000 m Höhe aufgenommen. Es wird ein Bildelement unter dem Nadirwinkel  $\alpha = 30^\circ$  betrachtet. Der spektrale Emissionsgrad der Geländeoberfläche sei im aufgenommenen Spektralbereich  $\epsilon(\lambda) = 0.95$ , der Transmissionsgrad der Atmosphäre  $\tau_A(\lambda=10\mu\text{m}, h=2000\text{m}, \theta=0) = 0.80$  und die spektrale Strahldichte der Atmosphäre  $L_{L,\lambda=10\mu\text{m}}(h=2000\text{m}, \alpha=30^\circ) = 1.7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ . Die spektrale Bestrahlungsstärke der Geländeoberfläche durch Gegenstrahlung sei  $E_{GH,\lambda=10\mu\text{m}} = 7.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ . Weitere Angaben zum Abtaster:  $d_0 = 8.3 \text{ cm}$ ,  $f = 33.3 \text{ cm}$ ,  $\tau_0 = 60\%$ .

Gesucht:

- a) die Bestrahlungsstärke  $E_D$  des Thermaldetektors,
- b) die (gemessene) Strahlungstemperatur  $T_S$ ,
- c) der Einfluß des Emissionsgrades der Geländeoberfläche auf die (gemessene) Strahlungstemperatur,
- d) der Einfluß der vom Gelände nach oben reflektierten Gegenstrahlung auf die (gemessene) Strahlungstemperatur,
- e) der Einfluß des Transmissionsgrades der Atmosphäre auf die (gemessene) Strahlungstemperatur (bei gleichbleibender thermischer Emission der Atmosphäre),
- f) der Einfluß der von der Atmosphäre direkt nach oben emittierten Thermalstrahlung auf die (gemessene) Strahlungstemperatur.

Lösung: Wir nehmen an, daß die spektrale Strahldichte des schwarzen Körpers  $L_{SK,\lambda}$  über den gesamten betrachteten Spektralbereich konstant gleich  $9.9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$  angenommen werden kann (= Ergebnis des Zahlenbeispiels der Gleichung (2.6-2)). Auch alle anderen spektralen Größen werden im Intervall  $[\lambda_1, \lambda_2]$  als konstant angenommen, sodaß die in (3.2-32) vorgesehene Integration sehr einfach durchzuführen ist:

$$\begin{aligned}
 \text{a) } E_D &= \frac{d^2}{4 \cdot f^2} (\lambda_2 - \lambda_1) \tau_0 \left[ \left( \epsilon \cdot L_{SK,\lambda}(T_G) + (1-\epsilon) \frac{E_{GH,\lambda}}{\pi} \right) \cdot \tau_A \frac{1}{\cos \alpha} + L_{L,\lambda} \right] \\
 &= 0.0488 \cdot 2 \cdot 0.6 \left[ (0.95 \cdot 9.9 + 0.05 \frac{7.5}{\pi}) \cdot 0.8 \frac{1}{0.866} + 1.7 \right] \\
 &= 0.05855 \left[ (0.95 \cdot 9.9 + 0.05 \cdot 2.387) \cdot 0.7729 + 1.7 \right] = 0.531 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}
 \end{aligned}$$

- b) Der Detektor empfängt Strahlung, die der von einem schwarzen Körper der Temperatur  $T_S$  ausgehenden Strahlendichte  $L_{SK,\lambda}(T_S)$  entspricht. Unter Beachtung der Gleichung (3.2-28) folgt:

$$\begin{aligned}
 L_{SK,\lambda}(T_S) &= \left( \epsilon \cdot L_{SK,\lambda}(T_G) + (1-\epsilon) \frac{E_{GH,\lambda}}{\pi} \right) \cdot \tau_A \frac{1}{\cos \alpha} + L_{L,\lambda} \\
 &= 9.061 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}.
 \end{aligned}$$

Daraus folgt unter Verwendung der Gleichung (2.6-2):

$$T_S = \frac{c_2}{\lambda \cdot \ln \left( \frac{c_1}{L_{SK,\lambda} \cdot \lambda^5} + 1 \right)} = 294.6 \text{ K} \hat{=} 21.4^\circ\text{C}$$

- c) Mit  $\epsilon = 1$  erhält man:

$$L_{SK,\lambda}(T_S) = L_{SK,\lambda}(T_G) \cdot \tau_A \frac{1}{\cos \alpha} + L_{L,\lambda} = 9.351 \rightarrow T_S = 296.5 \text{ K} \hat{=} 23.3^\circ\text{C}$$

Der Emissionsgrad  $\epsilon = 0.95$  der Geländeoberfläche bewirkt also eine Erniedrigung der gemessenen Strahlungstemperatur um  $\Delta T = 23.3 - 21.4 = 1.9^\circ\text{C}$ . Man vergleiche dieses Resultat mit einem Ergebnis nach Gleichung (2.6-5):  $\Delta T = 0.2 \cdot T \cdot \Delta \epsilon / \epsilon = 0.2 \cdot 300 \cdot 0.05 = 3 \text{ K} \hat{=} 3^\circ\text{C}$  ! (Kommentar folgt)

- d) Ohne Gegenstrahlung erhält man:

$$L_{SK,\lambda}(T_S) = \epsilon \cdot L_{SK,\lambda}(T_G) \cdot \tau_A \frac{1}{\cos \alpha} + L_{L,\lambda} = 8.969 \rightarrow T_S = 293.9 \text{ K} \hat{=} 20.7^\circ\text{C}$$

Die nach oben reflektierte Gegenstrahlung erhöht also die gemessene Strahlungstemperatur um  $\Delta T = 21.4 - 20.7 = 0.7^\circ\text{C}$ .

- e) Mit  $\tau_A = 1$  erhält man:

$$L_{SK,\lambda}(T_S) = 11.224 \rightarrow T_S = 307.9 \text{ K} \hat{=} 34.7^\circ\text{C}.$$

Der Transmissionsgrad  $\tau_A < 1$  erniedrigt also die gemessene Strahlungstemperatur um  $\Delta T = 34.7 - 21.4 = 13.3^\circ\text{C}$ .

- f) Ohne  $L_{L,\lambda}$  erhält man:

$$L_{SK,\lambda}(T_S) = 7.361 \rightarrow T_S = 282.6 \text{ K} \hat{=} 9.4^\circ\text{C}.$$

Die nach oben emittierte Thermalstrahlung der Atmosphäre erhöht also die gemessene Strahlungstemperatur um  $\Delta T = 21.4 - 9.4 = 12^\circ\text{C}$ .

Dieses Zahlenbeispiel illustriert die Größenordnung der einzelnen Terme in Gleichung (3.2-32) und deren Einfluß auf die gemessenen Temperaturwerte.

Wir können daraus folgendes erkennen:

- Die gemessene Strahlungstemperatur unterscheidet sich von der wahren Temperatur der Geländeoberfläche nicht nur infolge eines Emissionsgrades  $\epsilon < 1$  der Geländeoberfläche, sondern auch auf Grund atmosphärischer Einflüsse.
- Der Einfluß des Emissionsgrades der Geländeoberfläche ist geringer als er nach Gleichung (2.6-5) zu erwarten wäre: Einerseits schwächt die Atmosphäre mit einem Transmissionsgrad  $\tau_A < 1$  das von der Geländeoberfläche kommende Signal ab, andererseits kompensiert die nach oben reflektierte Gegenstrahlung teilweise die Auswirkung einer Emissionsgradänderung.
- Der Transmissionsgrad  $\tau_A < 1$  der Atmosphäre erniedrigt die gemessene Strahlungstemperatur sehr stark.
- Die nach oben emittierte Thermalstrahlung der Atmosphäre erhöht die gemessene Strahlungstemperatur sehr stark.
- Die beiden zuletzt genannten Einflüsse kompensieren einander weitgehend, jedoch nicht zur Gänze: Als Summenwirkung kommt es im allgemeinen zu einer (meist nur geringfügigen) Erniedrigung der gemessenen Strahlungstemperatur. (Emissionsgrad und Absorptionsgrad der Atmosphäre sind gemäß (2.6-4a) zwar gleich; da die Lufttemperatur jedoch im allgemeinen unter der Temperatur der Geländeoberfläche liegt, überwiegt die Absorption.)

Aufgabe 3.2-12: Man wiederhole das obige Zahlenbeispiel für einen Emissionsgrad der Geländeoberfläche  $\epsilon = 0.92$ .

Zur näherungsweise Korrektur der mit Thermalabtastern gewonnenen Meßwerte werden Korrekturdiagramme verwendet (Bild 3.2-21). (In der Praxis arbeitet man allerdings nicht mehr mit Korrekturdiagrammen, sondern mit den dahinterstehenden mathematischen Beziehungen, Lorenz (1969), Lorenz (1973)).

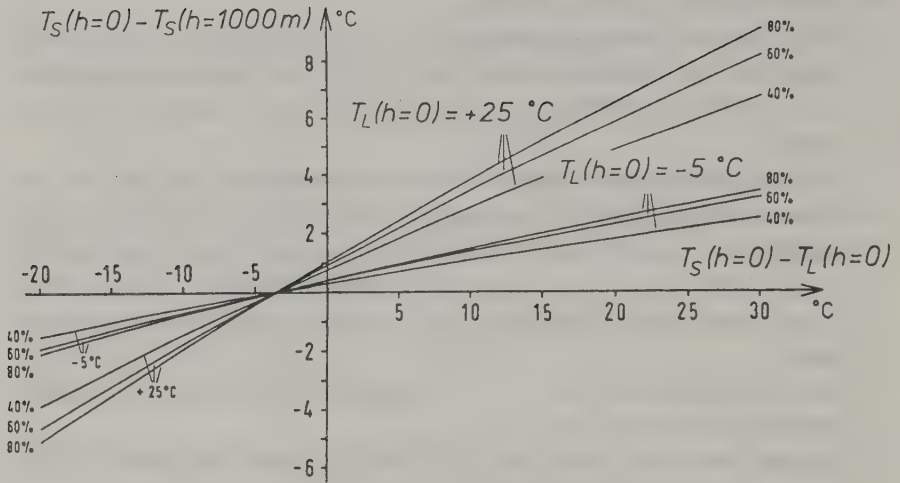


Bild 3.2-21: Differenz zwischen den Strahlungstemperaturen eines Geländeelementes gemessen in der Höhe  $h=0$ ,  $T_S(h=0)$ , und in der Höhe  $h=1000\text{m}$ ,  $T_S(h=1000\text{m})$ , in Abhängigkeit von der Differenz zwischen  $T_S(h=0)$  und der Lufttemperatur an der Geländeoberfläche,  $T_L(h=0)$ , für Modellatmosphären mit einem konstanten Temperaturgradienten von  $-0.6^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ , einer Lufttemperatur am Boden  $T_L(h=0) = -5^{\circ}\text{C}$  bzw.  $+25^{\circ}\text{C}$  und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 40%, 60% und 80%. (Lorenz, 1969)

Zahlenbeispiel: Man hat mit einem Abtaster in der Höhe  $h = 1000\text{ m}$  von einem Geländeelement unter dem Flugstreifen die Strahlungstemperatur  $T_S(h=1000\text{m})$  mit  $35^{\circ}\text{C}$  bestimmt, und zwar durch lineare Interpolation (3.2-31) mit Referenzstrahlern im Abtaster. Bei dieser Temperaturmessung wurde die Atmosphäre nicht berücksichtigt. Gefragt ist eine Korrektur der so ermittelten Temperatur  $T_S(h=1000\text{m})$ . Weitere Daten: Lufttemperatur am Boden  $T_L(h=0) = 25^{\circ}\text{C}$ ; 40% relative Luftfeuchtigkeit.

Mit  $T_S(h=1000\text{m}) - T_L(h=0) = 10^{\circ}\text{C}$  folgt aus Bild 3.2-21 (anstelle von  $T_S(h=0)$  kann man (zunächst)  $T_S(h=1000\text{m})$  annehmen):  $T_S(h=0) - T_S(h=1000\text{m}) = 2.85^{\circ}\text{C}$   $\rightarrow T_S(h=0) = 35 + 2.85 = 37.85^{\circ}\text{C}$ .

Mit der Differenz  $T_S(h=0) - T_L(h=0) = 12.85^{\circ}\text{C}$  könnte noch eine Verfeinerung durchgeführt werden.

Für die Temperaturmessung mit Abtastern ist zu empfehlen, daß die Aufnahmen

- wie aus Bild 3.2-21 ersichtlich - bei
- geringer Lufttemperatur,
- geringer relativer Luftfeuchtigkeit und
- geringer Differenz zwischen Objekttemperatur und Lufttemperatur

durchgeführt werden. Nachtflüge bieten in der Regel bessere Bedingungen als Tagflüge.

Aufgabe 3.2-13: Mit einem Abtaster wurde in der Höhe  $h = 1000$  m von einem Geländeelement unter dem Flugstreifen die Strahlungstemperatur  $T_S(h=1000\text{m})$  mit  $4^\circ\text{C}$  ermittelt, und zwar durch lineare Interpolation mit Referenzstrahlern. Man berechne die Korrektur der so ermittelten Strahlungstemperatur mittels des Atmosphärenmodelles des Bildes 3.2-21. Als meteorologische Parameter wurden gemessen: Lufttemperatur am Boden  $T_L(h=0) = -5^\circ\text{C}$ , Lufttemperatur in der Höhe  $T_L(h=1000\text{m}) = -11^\circ\text{C}$ , 40% relative Luftfeuchtigkeit.

Wegen des Einflusses des Emissionsgrades der Geländeoberfläche auf die gemessenen Temperaturwerte müssen die in einer Bildszene enthaltenen Objekt-klassen bekannt sein. Ihre Bestimmung ist z.B. mit Hilfe der Informationen im Sichtbaren und im nahen Infrarot aus den anderen Kanälen des Multispektralabtasters oder auch aus photographischen Farbinfrarotaufnahmen möglich. Für die jeweilige Objektklasse entnimmt man dann aus der Literatur - z.B. aus der Tab. 2.6-2 - den dazugehörigen Emissionswert.

In manchen Fällen wird man auch vor Ort stichprobenweise einige Emissionswerte messen. Zu diesem Zweck führt man meistens eine Strahlungstemperaturmessung aus, wobei das zu vermessende Erdoberflächenelement mit einem Kasten abgedeckt wird, der unten offen ist und dessen Seitenfläche sowie dessen Deckflächen verspiegelt sind. In der Deckfläche ist eine kleine Öffnung für das Strahlungsmeßgerät vorhanden. Bei dieser Anordnung wird die von der Erdoberfläche emittierte Strahlung  $\epsilon \cdot L_{SK}$  vom Spiegel zur Erdoberfläche zurückgeworfen und von dieser mit dem Reflexionsgrad  $\rho = (1 - \epsilon)$  abermals nach oben reflektiert, sodaß man in Summe ungefähr die Strahlendichte  $\epsilon \cdot L_{SK} + (1 - \epsilon) \cdot L_{SK} = L_{SK}$  mißt. Bei einer zweiten Messung ersetzt man den verspiegelten Deckel des Kastens durch einen aufheizbaren schwarzen Deckel, sodaß man "Gegenstrahlung" unterschiedlicher Intensität simulieren kann. Aus diesen Messungen ist dann mit Hilfe von Gleichung (3.2-32) der Emissionsgrad  $\epsilon$  der Geländeoberfläche zu ermitteln. Weitere Details findet man z.B. bei Lorenz (1973).

Anstelle der Korrektur mit einer Modellatmosphäre oder zusätzlich dazu wird man bei genauen Erhebungen simultan zum Überflug an einigen Punkten der Erdoberfläche mit einem Kontaktthermometer die Objekttemperaturen messen (Bodenmessungen bzw. Temperaturpaßpunkte). Mit einfachen Interpolationsverfahren kann man mit diesen Beobachtungen das Ergebnis weiter verfeinern.



### 3.2.1.5 Das Signal/Rauschverhältnis in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern

Wir wollen nun die vom Abtaster gemessenen Strahlungsflußdifferenzen  $\Delta I_D$  in Beziehung setzen zum unvermeidlichen Detektorrauschen. Das Detektorrauschen haben wir in Form der rauschäquivalenten Strahlungsleistung NEP bereits kennengelernt (3.2-26) und (3.2-27). Es hängt unter anderem von der Bandbreite  $\Delta f$  des Detektorsystems ab. Die Bandbreite  $\Delta f$  ist - wie aus den Beziehungen (3.2-25) und (3.2-23) ersichtlich - eine Funktion der Abtastfrequenz  $\nu$  und des Öffnungswinkels  $\Delta\alpha$ :

$$\Delta f = \frac{\nu \cdot \pi}{\Delta\alpha} \quad (3.2-33)$$

Bei der Betrachtung des Gesamtsystems, also der Abtastung der Erdoberfläche durch nebeneinanderliegende Zeilen (Bild 3.2-1), ersetzt man mittels (3.2-1) die Abtastfrequenz  $\nu$  durch die Plattformgeschwindigkeit  $V$  und die Flughöhe  $h$ . Die rauschäquivalente Strahlungsleistung NEP kann deshalb wie folgt angeschrieben werden:

$$\text{NEP} = \frac{(3.2-27) \sqrt{F_D} \sqrt{\Delta f}}{D^*} \stackrel{(3.2-1)}{=} \frac{(3.2-33) \sqrt{F_D} \sqrt{\pi} \sqrt{V/h}}{\Delta\alpha \cdot D^*} \quad (3.2-34)$$

Beispiel: Mit dem im Beispiel des Abschnittes 3.2.1.4 charakterisierten Abtaster soll das Gelände mit einer Bildelementgröße von  $\Delta Y = 2$  m aufgenommen werden. Man berechne:

- a) die dazu notwendige Flughöhe,
- b) die Fluggeschwindigkeit, die eingehalten werden muß, damit die abgetasteten Zeilen sich bei einer Abtastfrequenz  $\nu = 25$  Zeilen/s lückenlos aneinanderreihen,
- c) die Bandbreite des aufgenommenen Signals,
- d) die rauschäquivalente Strahlungsleistung, wenn  $D^*_{\lambda=0.55\mu\text{m}} = 10^8 \text{ m}\cdot\text{Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$  angenommen werden kann.

Lösung:

$$\text{a) } \Delta\alpha = \frac{\Delta Y}{h} \rightarrow h = \frac{\Delta Y}{\Delta\alpha} = \frac{2}{0.0015} = 1333 \text{ m}$$

$$\text{b) (3.2-1): } V = 0.0015 \cdot 1333 \cdot 25 = 50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \hat{=} 180 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$$

$$\text{c) (3.2-33): } \Delta f = \frac{25 \cdot \pi}{0.0015} = 52360 \text{ Hz} = 52.4 \text{ kHz}$$

$$\text{d) (3.2-34): } \text{NEP} = \frac{0.5 \cdot 10^{-3} \text{ m} \sqrt{\pi} \sqrt{50/1333 \text{ s}^{-1}}}{0.0015 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1/2} \text{ W}^{-1}} = 1.144 \cdot 10^{-9} \text{ W} = 1.144 \text{ nW}$$

Das Signal/Rauschverhältnis  $S/N$  des Detektorsignals ergibt sich nun aus dem



Verhältnis der Strahlungsflußänderung  $\Delta \dot{P}$ , die gemäß (3.2-28) aus einer Änderung  $\Delta L_G$  der Strahldichte hervorgeht, und der rauschäquivalenten Strahlungsleistung NEP:

$$S/N = \frac{\Delta \dot{P}_D}{NEP} = \frac{(3.2-28) \quad (3.2-34) \quad d_0^2 \cdot F_D \cdot \tau_0 \cdot \pi \cdot \Delta L_G \cdot \Delta \alpha \cdot D^*}{4 \cdot f^2 \sqrt{F_D} \sqrt{\pi} \sqrt{V/h}} = \frac{F_D = f^2 (\Delta \alpha)^2 \quad \sqrt{\pi} \tau_0 (\Delta \alpha)^2 d_0^2 \cdot D^* \cdot \Delta L_G}{4 f/d_0 \sqrt{V/h}} \quad (3.2-35)$$

Um das Signal/Rauschverhältnis in einem Spektralbereich der Breite  $\Delta \lambda$  zu erhalten, müssen wir  $\Delta L_G$  durch  $\Delta L_{G\lambda} \cdot \Delta \lambda$  ersetzen. Es ist zu beachten, daß auch  $D^*$  wellenlängenabhängig ist; wir schreiben daher  $D_\lambda^*$  und erhalten:

$$S/N = \frac{\sqrt{\pi} \cdot \tau_0(\lambda) \cdot (\Delta \alpha)^2 d_0^2 \cdot D_\lambda^* \cdot \Delta L_{G\lambda} \cdot \Delta \lambda}{4 f/d_0 \sqrt{V/h}} \quad (3.2-36)$$

$L_{G\lambda}$  kann gemäß (3.1-14) auf den (gerichteten spektralen) Reflexionsgrad  $\rho_r(\lambda)$  zurückgeführt werden:

$$S/N = \frac{\tau_0(\lambda) \cdot (\Delta \alpha)^2 d_0^2 \cdot D_\lambda^* \cdot \Delta \rho_r(\lambda) \cdot E_{G\lambda} \cdot \Delta \lambda}{4 \sqrt{\pi} f/d_0 \sqrt{V/h}} \quad (3.2-37)$$

Das Signal/Rauschverhältnis kann also umso größer sein (die radiometrische Auflösung kann umso besser sein),

- je größer  $\Delta \alpha$ , d.h. je schlechter die geometrische Auflösung ist,
- je größer  $\Delta \lambda$ , d.h. je schlechter die spektrale Auflösung ist,
- je effektiver das optische System des Abtasters die Strahlung sammelt, d.h. je größer der Durchmesser  $d_0$  des optischen Systems und je kleiner das Öffnungsverhältnis bzw. die Blendenzahl  $f/d_0$  ist,
- je günstiger die Rauscheigenschaften des Detektormaterials sind, d.h. je größer  $D_\lambda^*$  ist,
- je langsamer und je höher die Abtasterplattform fliegt,
- je größer die Reflexionsgradänderung  $\Delta \rho_r$  der abgetasteten Geländeoberfläche ist.

Jene Reflexionsgradänderung, für die das Signal/Rauschverhältnis  $S/N$  auf Eins absinkt, ist der rauschäquivalente Reflexionsgrad (die rauschäquivalente Reflexionsgradänderung)  $NE\Delta\rho_\lambda$ :

$$NE\Delta\rho(\lambda) = \frac{4 \sqrt{\pi} f/d_0 \sqrt{V/h}}{\tau_0(\lambda) \cdot (\Delta\alpha)^2 d_0 \cdot D_\lambda^* \cdot E_{G\lambda} \cdot \Delta\lambda} \quad (3.2-38)$$

Fortsetzung des Beispiels: Man ermittle die rauschäquivalente Reflexionsgradänderung des Abtastvorganges:

Lösung: Bei einem Reflexionsgrad von  $\rho_r = 0.15$  erhielten wir im Abschnitt 3.2.1.4 für  $\dot{\Phi}_D = 24.9$  nW, sodaß das Signal/Rauschverhältnis lautet:  $\dot{\Phi}_D/NE\dot{\Phi} = 24.9/1.144 = 21.8$ . Daher ist  $NE\Delta\rho = \rho_r/(S/N) = 0.15/21.8 = 0.0069 \hat{=} 0.69\%$ .

Zum selben Ergebnis kommen wir mit Gleichung (3.2-38):

$$NE\Delta\rho(\lambda) = \frac{4 \sqrt{\pi} \frac{0.333}{0.083} \sqrt{\frac{50}{1333}}}{0.6(0.0015)^2 \cdot 0.083 \cdot 10^8 \cdot 1423 \cdot 0.05} = 0.0069 \hat{=} 0.69\%$$

Für den thermischen Infrarotbereich gilt ebenfalls die Gleichung (3.2-36).  $\Delta L_{G\lambda}$  ist hier jedoch gemäß (2.6-2) und (2.6-3) auf die Geländeoberflächen-temperatur zurückzuführen, d.h.  $\Delta L_{G\lambda}$  ist zu ersetzen durch  $(dL_\lambda/dT) \cdot \Delta T$ .

Zur Abschätzung der rauschäquivalenten Temperaturänderung setzen wir in (3.2-36)  $S/N = 1$  und ersetzen  $\Delta L_{G\lambda}$  durch  $(dL_\lambda/dT) \cdot NE\Delta T$ . Dies ergibt:

$$NE\Delta T = \frac{4 f/d_0 \sqrt{V/h}}{\sqrt{\pi} \tau_0(\lambda) \cdot (\Delta\alpha)^2 d_0 \cdot D_\lambda^* \frac{dL_\lambda}{dT} \Delta\lambda} \quad (3.2-39)$$

Durch Differentiation von (2.6-2) erhält man unter Beachtung, daß für thermisches Infrarot und für übliche Temperaturen der Erdoberfläche  $e^{c_2/(\lambda \cdot T)} \gg 1$  ist:

$$\frac{dL_\lambda}{dT} \stackrel{(2.6-3)}{=} \epsilon(\lambda) \frac{dL_{SK,\lambda}}{dT} = \epsilon(\lambda) \frac{c_1 c_2}{\lambda^6 T^2} \frac{e^{-\frac{c_2}{\lambda \cdot T}}}{\left(e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} - 1\right)^2} \approx \frac{c_1 c_2}{\lambda^6 T^2} e^{-\frac{c_2}{\lambda \cdot T}}$$

Für  $\lambda = 10 \mu\text{m}$  und  $T = 300 \text{ K}$  ist  $dL_{SK,\lambda}/dT = 0.157 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1} \text{K}^{-1}$ , d.h. bei einer Oberflächentemperaturänderung von 1 K ( $1^\circ\text{C}$ ) ändert sich die spektrale Strahldichte um  $0.157 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$ , falls der spektrale Emissionsgrad  $\epsilon(\lambda) = 1$  ist.

Fortsetzung des Zahlenbeispiels: Der oben beschriebene Abtaster enthalte auch einen thermischen Kanal. Der zugehörige Detektor sei von 8  $\mu\text{m}$  bis 14  $\mu\text{m}$  empfindlich und habe eine Detektivität  $D_{\lambda=10\mu\text{m}} = 10^8 \text{ m}\cdot\text{Hz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ . Die Optik habe in diesem Wellenlängenbereich eine Durchlässigkeit von  $\tau_0 = 0.3$ . Man ermittle die rauschäquivalente Temperaturänderung für einen spektralen Emissionsgrad von  $\epsilon(\lambda=10\mu\text{m}) = 0.9$ :

$$\text{NE}\Delta T = \frac{4 \cdot \frac{0.333}{0.083} \sqrt{\frac{50}{1333}}}{\sqrt{\pi} \cdot 0.3 \cdot (0.0015)^2 \cdot 0.083 \cdot 10^8 \cdot 0.9 \cdot 0.157 \cdot 6} = 0.37 \text{ K} \hat{=} 0.37 \text{ }^\circ\text{C}$$

Die hier angegebenen Gesetzmäßigkeiten des Signal/Rauschverhältnisses haben nur näherungsweise Gültigkeit. Es wurden insbesondere folgende vereinfachende Annahmen getroffen:

- Das Rauschverhalten der Detektoren wurde ausschließlich durch die Detektivität  $D^*$  beschrieben, wobei implizit eine Flächen- und Frequenzabhängigkeit des Rauschens gemäß (3.2-26) angenommen wird. Je nach Detektortype sind jedoch verschiedenste Rauschmechanismen wirksam, die zum Teil eine von (3.2-26) abweichende Charakteristik aufweisen.
- Das Rauschen der den Detektoren nachgeschalteten Verstärker wurde vernachlässigt bzw. in das Detektorrauschen einbezogen.
- Die Bandbreite des Detektorsignals wurde durch Gleichsetzen der Ortsfrequenz (3.2-20) mit der Zeitfrequenz (3.2-21) gefunden. Diese Festsetzung trifft nicht immer zu. Eine um einen Faktor 2 abweichende Bandbreite ist durchaus möglich.
- Bei der Ermittlung der Bandbreite haben wir außerdem eine ideale Anordnung der nebeneinanderliegenden Zeilen, also keinen "over-" und keinen "underscan", unterstellt. In der Praxis tritt häufig eine Überlappung der benachbarten Zeilen auf.
- Der Einfluß der Atmosphäre wurde vernachlässigt. Bei der Formulierung der Beziehung (3.2-35) hätte man nicht auf (3.2-28) sondern auf (3.2-31) zurückgreifen müssen, was allerdings zu komplizierten Zusammenhängen geführt hätte, ohne die wesentlichen Aspekte erkennen zu können.

Trotz der getroffenen Vereinfachungen illustrieren die obigen Gleichungen deutlich die physikalischen und technischen Grenzen, die einer gleichzeitigen Erhöhung von geometrischer Auflösung, spektraler Auflösung und radiometrischer Auflösung entgegenstehen.

Es seien noch einige technische Möglichkeiten erwähnt, die die Leistungsfähigkeit mechanischer Abtaster über die angegebenen Grenzen hinaus erhöhen: Wenn das rotierende Prisma (Bild 3.2-1) nicht nur eine, sondern  $n$  spiegelnde Flächen enthält, sodaß pro Umdrehung des Prismas  $n$  Zeilen abgetastet werden, so kann die Abtastfrequenz  $\nu$  bei gleicher geometrischer Auflösung

um den Faktor  $n$  herabgesetzt werden. Eine andere Möglichkeit besteht darin, in der Bildebene der abbildenden Optik pro Spektralbereich nicht einen Detektor, sondern  $p$  Detektoren anzuordnen, sodaß gleichzeitig  $p$  Zeilen abgetastet werden (Bild 4.2-8). Bei Beachtung beider Möglichkeiten ist die Gleichung (3.2-1) zu ersetzen durch:  $V/h = \Delta\alpha \cdot v \cdot n \cdot p$ . Wiederholt man die obigen Ableitungen für diese geänderten Voraussetzungen, so erkennt man, daß sich das Signal/Rauschverhältnis  $S/N$  sowie  $NE\Delta p$  und  $NE\Delta T$  jeweils um den Faktor  $\sqrt{n \cdot p}$  verbessern. Eine weitere Verbesserungsmöglichkeit besteht darin, anstelle eines rotierenden Prismas ein wippendes optisches Element zu benutzen (siehe Abschnitt 4.2.2).

Eine noch weitergehende Verbesserung der Leistungsfähigkeit der Abtaster ist nur möglich, wenn man vom Prinzip des mechanischen Rotationsabtasters ganz abgeht und opto-elektronische Abtaster (3.2.2) benutzt.

Weiterführende Literatur: Lintz, Simonett (1976), Slater (1980).

### 3.2.1.6 Die Thermalstrahlung und die Zuordnung der entsprechenden Objekt-information

In den vorhergehenden Abschnitten wurde gezeigt, wie man aus der Thermalstrahlung die Temperatur der Gelände- und Wasserflächen ableitet. Der große Vorteil einer Temperaturmessung mit Abtastern im Vergleich zur örtlichen Temperaturmessung ist, daß die Fernerkundung eine flächenhafte Temperaturaufnahme liefert.

Thermalaufnahmen werden zur Lösung verschiedener Problemstellungen herangezogen. Eine große Bedeutung haben Thermalbilder von Gewässern erlangt. Bild 3.2-22 zeigt ein Thermalbild der Donau in der Nähe eines Kraftwerkes. Es ist nur ein kleiner Ausschnitt der Gesamtbefliegung der Donau, die das Österreichische Bundesinstitut für Gesundheitswesen durchgeführt hat (Zirm, Fibich, 1982).



TEMPERATURSKALA (°C)

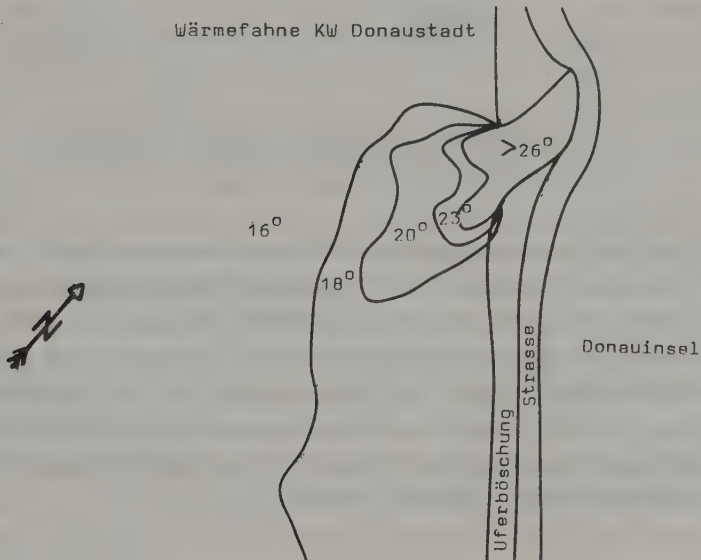


Bild 3.2-22: Thermalbild der Donau beim Kraftwerk Donaustadt (Das ursprüngliche Bild in Zirm, Fibich, 1982, ist in Farbe, weshalb die Schwarzweißskala nicht eindeutig ist)



Eine weitere wichtige Anwendung der Thermalaufnahmen ist die Überwachung der Temperatur in städtischen Gebieten. Der Tagesgang der Temperatur verschiedener Objekte ist im Bild 3.2-23 dargestellt. Man sieht daraus, daß Wasserflächen sehr ausgleichend auf das Klima wirken und daß auch Grünanlagen die thermische Belastung mildern. Um den vollständigen Tagesgang des Stadtklimas zu erfassen, müßte man mehrmals am Tag Thermalaufnahmen erfliegen. In der Praxis begnügt man sich im allgemeinen mit einer Tag- und einer Nachtaufnahme. Aus dem Bild 3.2-23 sieht man, daß die Uhrzeit der Befliegung in diesem Fall ein wichtiger Parameter ist.

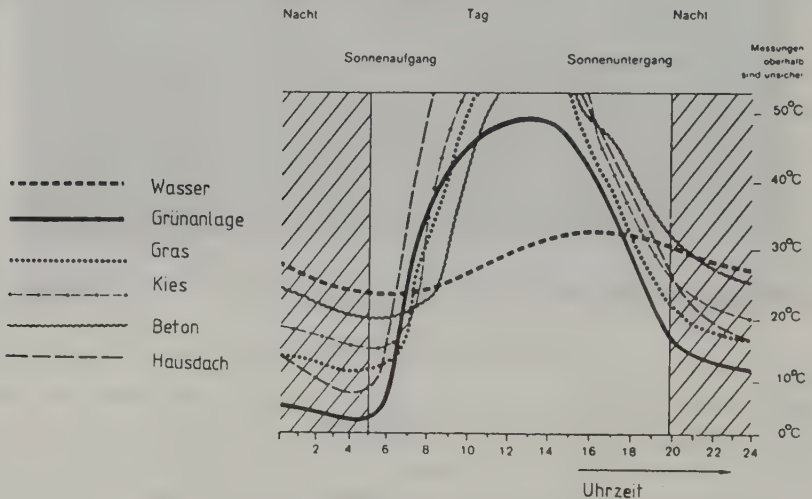


Bild 3.2-23: Tagesgang der Temperatur unterschiedlicher städtischer Landschaftselemente (entnommen aus Hirt, Kellersmann, 1972)

Zur Ermittlung von Vegetationsschäden haben Thermalaufnahmen ebenfalls eine gewisse Bedeutung erlangt. Z.B. haben verstaubte Bäume eine höhere Temperatur als Bäume, die nicht dem Staub ausgesetzt sind. Eine Gegenüberstellung der Lufttemperatur mit der Temperatur der Vegetation ist im Bild 3.2-24 veranschaulicht. Infolge der Transpiration ist die Vegetation an "warmen" Tagen deutlich kühler als die sie umgebende Luft. Besonders markant ist das rasche Ansteigen der Temperatur eines abgeschnittenen Blattes infolge des dadurch eintretenden Wassermangels.



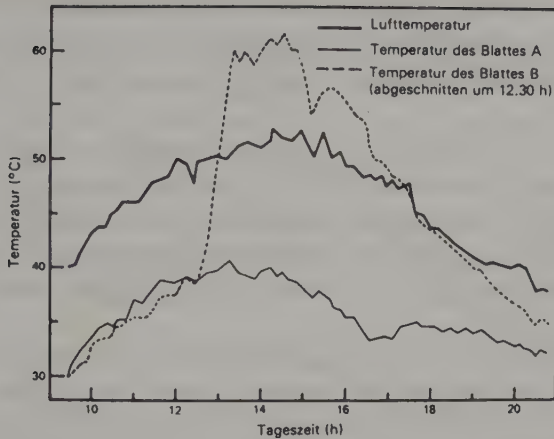


Bild 3.2-24: Lufttemperatur und Temperatur eines Blattes (A), das mit dem Baum verbunden ist, und eines Blattes (B), das um 12.30 h abgeschnitten wurde (entnommen aus Remmert, 1984)

Schließlich soll noch die Überwachung von Katastrophen angesprochen werden. Einen Waldbrand, der im Brandherd Temperaturen bis 600 K erreicht, nimmt man - laut Wienschem Verschiebungsgesetz (2.6-8) - am besten im Spektralbereich  $2898/600 = 4.5 \mu\text{m}$  auf. Zusätzlich ist aber auch ein Kanal zwischen 8 und  $14 \mu\text{m}$  interessant, der die Temperatur der Umgebung vorteilhaft registriert. Die Rauchwolken werden übrigens von Wellenlängen zwischen 2 und  $13 \mu\text{m}$  durchdrungen, sodaß in Aufnahmen in diesen Spektralbereichen die Brandherde lokalisiert werden können. In vielen Zeitschriften wurden in der letzten Zeit Scanneraufnahmen vom Reaktorunfall in Tschernobyl 1986 veröffentlicht. Dort traten Temperaturen bis 2800 K auf, die man günstig im Spektralbereich  $2898/2800 \approx 1 \mu\text{m}$  erfaßt. Zusätzlich waren aber auch die Aufnahmen mit längeren Wellenlängen von Interesse, insbesondere zur Erfassung der Temperatur des an den Reaktor anschließenden Kühlwassersees.

Aufgabe 3.2-14: Man hat vor Ort die (wahre) Temperatur  $T_{\text{wahr}} = 15.4^\circ\text{C}$  gemessen. Für jenes Bildelement, in dem diese Meßstelle liegt, ergab die Auswertung der Scannerdaten (Spektralbereich etwa bei  $10 \mu\text{m}$ ) eine Strahlungstemperatur von  $T_{\text{Str.}} = 13.2^\circ\text{C}$ . Man berechne den spektralen Emissionsgrad  $\epsilon_{\lambda=10\mu\text{m}}$  für das in diesem Bildelement abgebildete Flächenelement.

Zusätzliche Literatur: Fezer (1975); Goßmann (1984), Seger, Mandl (1985), Stock (1975).

### 3.2.1.7 Gegenüberstellung photographischer Systeme und Abtaster

Den Abschluß dieses Kapitels über mechanische Abtaster soll eine pauschale Gegenüberstellung von photographischen Systemen und Rotationsabtastern bilden:

- Flugzeug: In photographischen Aufnahmen erkennt man um mindestens eine Größenordnung kleinere Details als in Scanneraufnahmen. Sofern geometrische Parameter oder semantische Information im sichtbaren und nahen infraroten Spektralbereich zu erfassen sind, wird man deshalb die Photographie einsetzen. Sind Wärmebilder gefragt, muß man einen Abtaster nehmen.
- Satellit: Der Abtaster hat den großen Vorteil der nachrichtentechnischen Übertragung des Bildinhaltes. Abtaster liefern bei üblichen Systemparametern auch eine bessere geometrische Auflösung als die Photographie.
- Die Photographie ist ein komfortabler, kompakter Speicher der großen Informationsfülle, der besonders für die analoge Auswertetechnik Vorteile bietet. Für eine Auswertung mit digitaler Bildverarbeitung müssen die Photographien digitalisiert werden.
- Der Abtaster erlaubt eine simultane Aufnahme von mehr als drei Kanälen; dabei kann der Bereich eines jeden Kanales im elektromagnetischen Spektrum sehr schmal gehalten werden (sehr gute spektrale Auflösung).
- Beim Abtaster erfolgt während der Aufnahme bereits eine Quantifizierung der Strahlung. Abtaster liefern exakte radiometrische Meßwerte. Photographische Bilder stellen demgegenüber nichtlineare, radiometrische Aufzeichnungen dar, die wegen der zugrundeliegenden chemischen Prozesse nur mangelhaft reproduzierbar sind. Bei der Aufnahme kommt es zu keiner (zahlenmäßigen) Quantifizierung. Erst nach mehreren, nicht genau kontrollierbaren Schritten, kann mit Densitometern eine Quantifizierung nachgeholt werden.

### 3.2.2 Digitale Zeilenkameras (opto-elektronische Abtaster)

Der Rotationsabtaster, dessen Konstruktionsprinzip im Abschnitt 3.2.1.1 erläutert wurde, hat zwei große Nachteile:

- Die Rotationsmechanik unterliegt einem verhältnismäßig raschen Verschleiß, sodaß der Einsatz zumindest in unbemannten Satelliten große Probleme aufwirft.
- Das Signal/Rauschverhältnis ist verhältnismäßig schlecht, sodaß z.B. das geometrische Auflösungsvermögen einer Scanneraufnahme mit dem Flugzeug im Vergleich zur Photographie wesentlich geringer ist. Es könnte, wie oben gezeigt wurde, nur auf Kosten der spektralen Auflösung und/oder der radiometrischen Auflösung verbessert werden.

Beide Nachteile können mit einem anderen Abtastsystem, bei dem eine ganze Zeile von Detektoren in der Brennebene einer Empfangsoptik angeordnet ist, umgangen werden (Bild 3.2-25). Bei dieser Zeilenkamera werden in kurzen Zeitabständen die elektrischen Signale aller Detektoren ausgelesen. Anschließend werden die Strahlungswerte entweder auf ein Magnetband mit großer Schreibdichte (HDDT) gespeichert (bei einem Einsatz im Flugzeug) oder nachrichtentechnisch zu einer Bodenstation übertragen (bei einem Einsatz im Satelliten). Diese Technik des schubweisen Abtastens bezeichnet man im Englischen mit push broom ( $\hat{=}$  "Kehrbesen-scanning"). Die Detektorzeile besteht aus Siliziumdioden und arbeitet nach dem "charge coupled device"-Prinzip (CCD).

Die spektrale Empfindlichkeit der z.Z. verfügbaren CCD-Sensoren liegt nur zwischen 0.4 und 1.0  $\mu\text{m}$ . Einer Aufzeichnung der Wärmestrahlung, die bekanntlich eine Wellenlänge von etwa 10  $\mu\text{m}$  hat, mit der digitalen Zeilenkamera steht außerdem noch das Objektiv der Kamera im Wege (Bild 3.2-25). Die digitale Zeilenkamera ist also beim gegenwärtigen Stand der Technik nur für die Strahlungsmessung im sichtbaren und nahen infraroten Spektralbereich einsetzbar. Ein multispektrales Bild entsteht durch Montage mehrerer Einzelkammern zu einer Mehrfachkamera, wobei vor das Objektiv jeder Einzelkamera Filter geschaltet werden, die die Spektralbereiche festlegen.

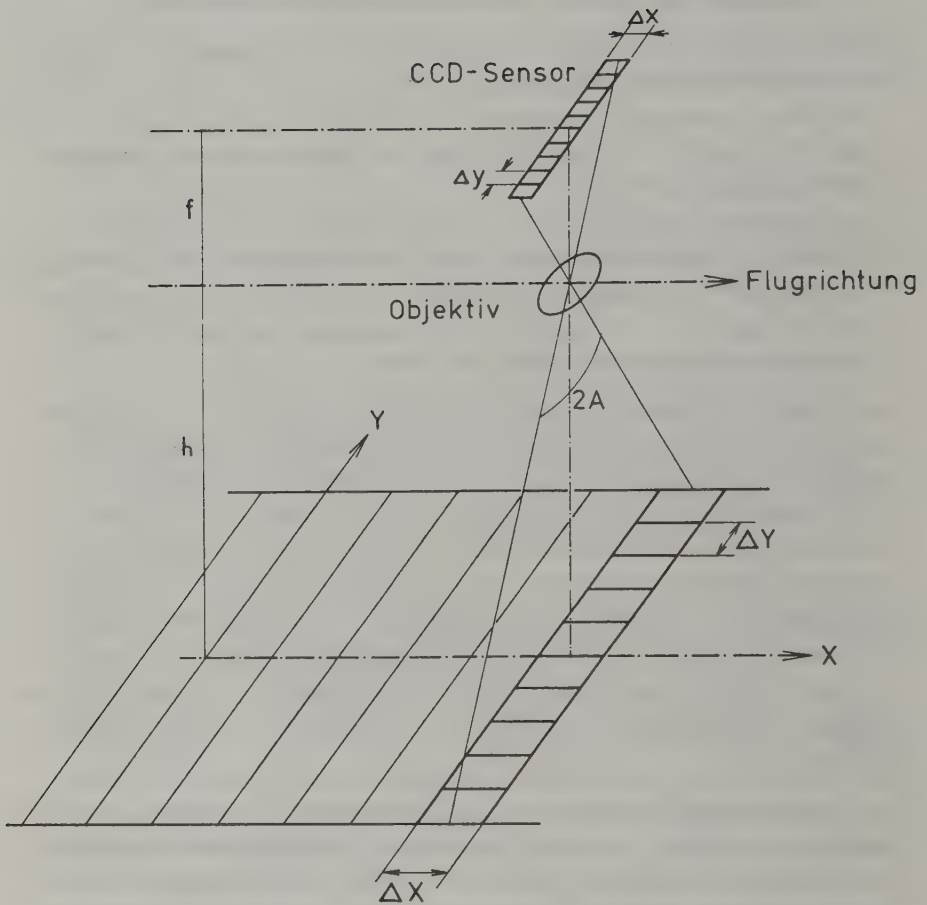


Bild 3.2-25: Digitale Zeilenkamera

Die Zeilenkamera MOMS (modularer opto-elektronischer Multispektral-Scanner) der Fa. Messerschmidt-Bölkow-Blohm ( $\hat{=}$  MBB), München, nimmt z.B. in den beiden Spektralbereichen 575-625 nm und 825-975 nm auf. Weitere technische Details dieser für Satelliten konzipierten Kamera: Brennweite  $f = 237$  mm, Öffnung  $d_L:f = 1:3.5$ , Bildpunkte je Zeile = 6912, Bildelementgröße  $\Delta x = \Delta y = 16 \mu\text{m}$ , Zeilenlänge  $s = 110.6$  mm, Zeilenfrequenz  $\nu = 350$  Hz, maximale Verzeichnung des Objektivs  $\Delta\rho = \pm 8 \mu\text{m}$  (Hofmann, 1982).





Bild 3.2-26: Aufnahme mit der MOMS-Zeilenkamera (Spektralbereich 825-975 nm, von O. Hofmann, Fa. Messerschmidt-Bölkow-Blohm, zur Verfügung gestellt; freigegeben von der Regierung in Oberbayern GS 82/2419/82)



Die geometrische Auflösung ist sehr gut. Der Öffnungswinkel  $\Delta\alpha$  beträgt für die Zeilenkamera MOMS in Zeilenmitte  $0.016/237 = 0.0675$  mrad, also fast um den Faktor 20 besser als bei den Rotationsabtastern (Tab. 3.2-3). Das geometrische Auflösungsvermögen AV quer zum Flugstreifen kann aus der Bildelementgröße abgeschätzt werden (siehe Abschnitt 3.2.1.2):  $AV < 1/(2 \cdot 0.016) = 31$  lp/mm. Es entspricht etwa dem Auflösungsvermögen photographischer Systeme. Bild 3.2-26 zeigt die Aufnahme einer digitalen Zeilenkamera, aufgenommen mit einem Flugzeug. Sehr gut ist auch die geometrische Präzision von MOMS: Die maximale Verzeichnung des Objektives beträgt nur  $\pm 8 \mu\text{m}$ . Außerdem ist zu erwähnen, daß eine Bildzeile eine exakte Zentralprojektion ist. Es tritt also keine Panoramaverzerrung (6.4.2.1) auf.

Als Nachteil einer digitalen Zeilenkamera ist allerdings zu erwähnen, daß alle Detektoren gleich empfindlich sein müssen. Teilweise wird dieses schwierige Kalibrierungsproblem sogar erst im Rahmen der Bildauswertung softwaremäßig gelöst.

Damit die Zeilen lückenlos zusammenpassen (Bild 3.2-25), muß folgende Beziehung, die wir in der Form der Gleichung (3.2-1) bereits kennengelernt haben, gelten:

$$\frac{\Delta x \cdot h \cdot v}{f} = v \quad \rightarrow \quad \boxed{\frac{v}{h} = \frac{\Delta x \cdot v}{f}} \quad (3.2-40)$$

Aufgabe 3.2-15: Mit einer MOMS-Kamera soll in einer Höhe von 4000 m eine Aufnahme durchgeführt werden. Man berechne die Geschwindigkeit des Flugzeuges, wenn die benachbarten Zeilen sich lückenlos aneinanderfügen sollen (Ergebnis: 340 km/h). Wie groß ist die Breite der Streifenpaare auf der Erdoberfläche, die mit dieser Aufnahme quer zur Flugrichtung noch erkannt werden? Wie groß ist die Breite der Streifenpaare auf der Erdoberfläche, die mit dieser Aufnahme in Flugrichtung noch erkannt werden?

Bezüglich der wirksamen Bestrahlung ist die digitale Zeilenkamera mit der photographischen Meßkamera vergleichbar. Die Ausführungen des Abschnittes 3.1.1.3 - insbesondere die Gleichung (3.1-13) - sind also entsprechend anzuwenden. Hinsichtlich des Signal/Rauschverhältnisses haben wir bei der digitalen Zeilenkamera um ein bis zwei Größenordnungen günstigere Bedingungen als beim Rotationsabtaster. Die Bandbreite  $\Delta f$  des elektrischen Signales, die die rauschäquivalente Strahlungsleistung NEP - wie aus der Beziehung (3.2-26) ersichtlich - stark beeinflusst, ist nämlich bei der digitalen Zeilenkamera wesentlich günstiger als beim Rotationsabtaster. Beim Rotationsabtaster haben wir für die Bandbreite die Beziehung (3.2-33) erhalten. Im Vergleich dazu lautet die Bandbreite bei der digitalen Zeilenkamera:

$$\Delta f = a \cdot v \quad (3.2-41)^1$$

$v$  = Zeilenfrequenz, d.h.  $1/v$  ist die Zeitspanne, die zwischen dem Beginn des aufeinanderfolgenden Auslesens der CCD-Sensoren verstreicht.

$a$  = Faktor (z.B.  $a = 2$ ), der unter anderem berücksichtigt, daß das Auslesen selbst auch eine gewisse Zeit erfordert.

Beispiel: Im Abschnitt 3.2.1.5 haben wir für einen Rotationsabtaster eine Bandbreite von 52.4 kHz erhalten. Für die Zeilenkamera MOMS ergibt sich folgende (wesentlich geringere) Bandbreite:  $\Delta f = 2 \cdot 350 = 700$  Hz.

Die Herstellerfirmen von CCD-Detektoren beschreiben die Qualität ihrer Produkte gerne mit der sogenannten rauschäquivalenten Bestrahlung NEE (noise equivalent exposure). Darunter versteht man die kleinste noch nachweisbare Bestrahlung  $H$  ( $\hat{=}$  Bestrahlungsstärke  $E[W \cdot m^{-2}]$  x Bestrahlungszeit  $t[s]$ ) bzw. Bestrahlungsdifferenz  $\Delta H$ . Ihre Dimension ist  $W \cdot s \cdot m^{-2}$ . Um den Zusammenhang zwischen geometrischer und spektraler Auflösung mit der rauschäquivalenten Bestrahlung NEE zu sehen, gehen wir für die Bestrahlungsstärke  $E_D$  von den Gleichungen (3.1-13) und (3.1-14) aus und ersetzen  $E_G$  durch  $E_{G\lambda} \cdot \Delta\lambda$ . Bezeichnet man die Bestrahlungszeit mit  $\Delta t$ , so lautet die Bestrahlung für einen unter dem Bildwinkel  $\alpha$  positionierten Detektor:

$$H_D = \frac{d_L^2 \cos^4 \alpha \cdot \tau_0 \cdot \rho_r \cdot E_{G\lambda} \cdot \Delta\lambda \cdot \Delta t}{4 \cdot f^2} \quad (3.2-42)$$

Die Bestrahlungszeit  $\Delta t = 1/\Delta f$ , sodaß sich laut (3.2-41) ergibt:

$$\Delta t = \frac{1}{\Delta f} = \frac{1}{a \cdot v} = \frac{\Delta x \cdot h}{a \cdot V \cdot f} = \frac{\Delta \alpha \cdot h}{a \cdot V} \quad (3.2-43)$$

$\Delta \alpha = \Delta x/f$  = Öffnungswinkel in Streifenmitte.

Die rauschäquivalente Reflexionsgradänderung  $NE\Delta\rho_r$  ist nun jener Wert für  $\rho_r$ , für den  $H_D$  gemäß (3.2-42) gleich NEE wird. Unter Beachtung von (3.2-43) folgt:

$$NE\Delta\rho_r = \frac{4(f/d_L)^2 a \cdot (V/h) \cdot NEE}{\cos^4 \alpha \cdot \tau_0 \cdot E_{G\lambda} \cdot \Delta \alpha \cdot \Delta \lambda} \quad (3.2-44)$$

Man sieht, daß auch bei der digitalen Zeilenkamera die radiometrische Auflösung, also  $NE\Delta\rho_r$ , umso günstiger (kleiner) ist,

- je größer  $\Delta \alpha$ , d.h. je schlechter die geometrische Auflösung ist, und
- je größer  $\Delta \lambda$ , d.h. je schlechter die spektrale Auflösung ist.

<sup>1</sup> Mit sogenannten TDI-Sensoren (time delay and integration) läßt sich die Bandbreite  $\Delta f$  noch weiter reduzieren. Zu diesem Zweck sind mehrere Zeilensensoren hintereinander angeordnet. Das jeweilige elektrische Signal wird - entsprechend der Bildwanderung - weitergeschoben, aufaddiert und erst dann ausgelesen.

Beispiel: Mit der digitalen Zeilenkamera MOMS mit den Kennwerten  $f/d_L = 3.5$ ,  $\Delta\alpha = 0.016/237 = 0.0675$  mrad,  $\tau_0 = 0.5$ ,  $\Delta\lambda = 0.05 \mu\text{m}$ ,  $a = 2$  und  $NEE = 4 \cdot 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$  wird ein Acker aufgenommen, der eine spektrale Bestrahlungsstärke  $E_{\lambda} = 0.60 \mu\text{m} = 1423 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$  aufweist. (Der Einfluß der Atmosphäre wird vernachlässigt.) Die Flughöhe beträgt 1333 m, die Plattformgeschwindigkeit  $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \hat{=} 180 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ . (Diese Werte entsprechen dem Beispiel mit dem Rotationsabtaster im Abschnitt 3.2.1.5.) Man berechne die rauschäquivalente Reflexionsänderung in Streifenmitte ( $\alpha = 0$ ) mittels der Gleichung (3.2-44):

$$NE\Delta\rho_r = \frac{4 \cdot 3.5^2 \cdot 2 \cdot (50/1333) \text{s}^{-1} \cdot 4 \cdot 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}}{0.5 \cdot 1423 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \cdot 0.0675 \cdot 10^{-3} \cdot 0.05 \mu\text{m}} = 0.0061 \hat{=} 0.61\%$$

Ergebnis: Es ergibt sich etwa die gleiche radiometrische Auflösung wie beim Rotationsabtaster (siehe Beispiel im Abschnitt 3.2.1.5). Die geometrische Auflösung ist bei der digitalen Zeilenkamera aber um den Faktor  $0.0015/0.0000675 = 22$  besser.

Aufgabe 3.2-16: Man wiederhole das Beispiel a) für ein Bildelement unter einem Bildwinkel  $\alpha = 30$  gon, b) für den zweiten Spektralbereich der MOMS-Kamera mit  $\Delta\lambda = 0.15 \mu\text{m}$  und  $E_{\lambda} = 0.90 \mu\text{m} = 1525 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$  und c) mit Berücksichtigung der Atmosphäre in der Weise, daß sie entlang des lotrechten Strahlungspfades 50% der Strahlung absorbiert.

Das Prinzip der spektralen Zerlegung mit Mehrfachkameras ist sehr schwerfällig. Es erlaubt nur eine geringe Anzahl von Spektralbereichen. Vor wenigen Jahren ist ein neuartiges Prinzip der spektralen Zerlegung für digitale Zeilenkameras auf den Markt gekommen, das anhand des Bildes 3.2-27 erläutert werden soll: Die unterste Linse bildet das Gelände auf einen Schlitz ab. Die Zwischenlinse erzeugt einen parallelen Strahlungsverlauf, der mittels eines Beugungsgitters spektral zerlegt wird. Die oberste Linse sammelt diese Strahlen in der Bildebene, in der die CCD-Sensoren angeordnet sind. Abhängig von der Positionierung der CCD-Sensoren in Flugrichtung empfängt der jeweilige Detektor eine Strahlung anderer Wellenlänge. Die Anordnung der Detektoren in Flugrichtung bestimmt somit die spektrale Auflösung des aufgenommenen Multispektralbildes. Die Anordnung der Detektoren quer zur Flugrichtung bestimmt - wie bei jeder Zeilenkamera - die geometrische Auflösung des aufgenommenen Bildes.

Die Firma Messerschmidt-Bölkow-Blohm ( $\hat{=}$  MBB), München, bietet unter der Bezeichnung ROSIS ( $\hat{=}$  reflective optics system imaging spectrometer) eine nach diesem Prinzip konzipierte digitale Zeilenkamera an. Das Modell für das Flugzeug ist inzwischen fertiggestellt; ein entsprechendes Modell für den Satelliten ist in Entwicklung. Einige technische Daten: Gesamtöffnungswinkel  $\pm 16^\circ$ ; Öffnungswinkel  $0.55$  mrad (Bildelementgröße  $0.55$  m bei einer Flughöhe von  $1000$  m); Anzahl der Bildelemente für die geometrische Auflösung  $512$ ; Anzahl der Bildelemente für die spektrale Auflösung  $256$ , wobei wahlweise maximal  $28$  ausgelesen werden können; Breite des einzelnen Spektralbereiches  $2.5$  nm.

Die Fa. MONITEQ, Canada, bietet für den Flugzeugeinsatz ein einschlägiges Gerät mit folgenden technischen Daten an: Gesamtöffnungswinkel  $\pm 35^\circ$ ; Öff-

nungswinkel  $0.65 \text{ mrad}$  (Bildelementgröße  $0.65 \text{ m}$  bei einer Flughöhe von  $1000 \text{ m}$ ); Anzahl der Bildelemente für die geometrische Auflösung 1925; Anzahl der Spektralkanäle bei voller spektraler Auflösung 288, wobei entweder 40 Bildelemente in 288 Spektralbereichen oder 1925 Bildelemente in 8 Spektralbereichen ausgelesen werden können; der Spektralbereich zwischen  $430$  und  $800 \text{ nm}$  wird in Intervalle von  $1.3 \text{ nm}$  aufgelöst; Signal/Rauschverhältnis  $1500:1$  bei vollem Signal.

Zusätzliche Literatur: Hofmann (1982).

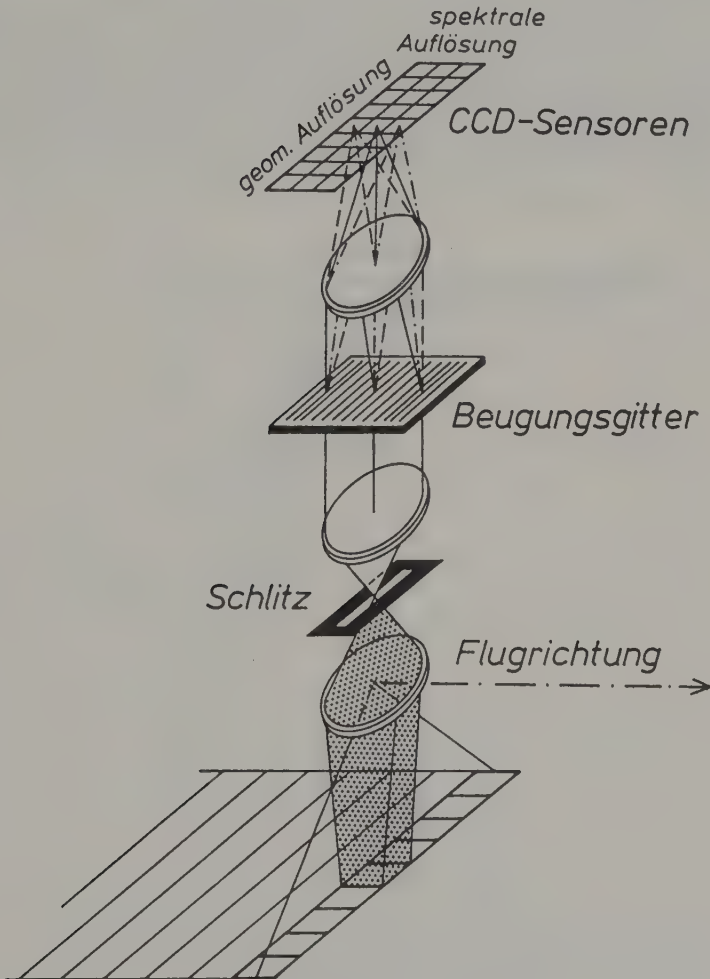


Bild 3.2-27: Digitale Zeilenkamera mit Beugungsgitter für die spektrale Zerlegung

### 3.3 Nichtphotographische Flächensensoren

Die zeilenweise Anordnung der Detektoren nach dem CCD-Prinzip kann prinzipiell auch auf eine flächenhafte Anordnung ausgedehnt werden. Bisher wurden allerdings nur flächenhafte Sensoren nach diesem Prinzip für eine Bildgröße von ca.  $2000 \times 2000$  Detektoren bekannt. Das Auslesen dieser  $4 \cdot 10^6$  Detektoren beträgt mehrere Sekunden, sodaß es bei Luftaufnahmen eine große Bewegungsunschärfe gibt. Eine Lösung kann die Zusammenfassung der Detektoren innerhalb kleiner Rasterbereiche sein, die mit Parallelprozessoren gleichzeitig ausgelesen werden. In einigen Jahren stehen mit Sicherheit interessante Flächensensoren für die Fernerkundung zur Verfügung.

Flächensensoren können auch mit einer Speicherbildröhre verwirklicht werden. Sie spielten bei früheren Satellitenmissionen eine verhältnismäßig große Rolle (im Englischen: RBV = return beam vidicon). Ein solcher Sensor ist im wesentlichen eine TV-Kamera mit Verschuß; in der Bildebene der Kameraoptik ist eine hochauflösende Speicherbildröhre, deren Ladungszustand seriell ausgelesen wird, angeordnet. Die Bildröhren haben den großen Nachteil, daß ihre Stabilität und Zuverlässigkeit sehr zu wünschen übrig läßt. Außerdem können keine Thermalbilder aufgenommen werden.



### 3.4 Mikrowellensysteme

#### 3.4.1 Einleitung

Die Mikrowellen-Fernerkundung ist eine sehr junge Technik, die erst wenige praktische Anwendungen gefunden hat. Auf Grund von bisherigen experimentellen Untersuchungen und von theoretischen Überlegungen ist jedoch zu erwarten, daß ihre Bedeutung in Zukunft stark anwachsen wird. Diese Erwartung gründet sich vor allem auf folgende interessante Eigenschaften von Mikrowellen, die zum Teil in Kapitel 2. schon angedeutet worden sind:

- a) Der Transmissionsgrad  $\tau$  der Atmosphäre für Mikrowellen ist sehr groß. Auch Wolken und sogar Regen schwächen zumindest längerwellige Mikrowellen kaum ab (Bild 3.4-1). Mikrowellen-Fernerkundungssysteme können daher bei (fast) jedem Wetter eingesetzt werden, woraus sich ein unschätzbarer Vorteil gegenüber Systemen im optischen Spektralbereich ergibt.

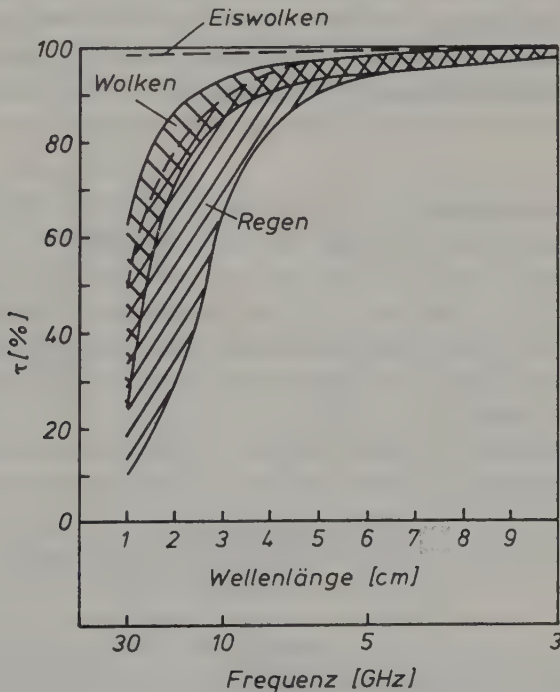


Bild 3.4-1: Transmissionsgrad der Atmosphäre vom Boden bis zur Höhe von Satelliten für Mikrowellen (nach Ulaby et al., 1981)

- b) Es gibt passive und aktive Mikrowellen-Aufnahmesysteme (siehe Abschnitt 2.1). Passive Systeme messen die von der Geländeoberfläche emittierten Mikrowellen, während aktive Systeme Mikrowellen zur Geländeoberfläche hin aussenden und die reflektierte Strahlung erfassen. Man ist in beiden Fällen von der Sonnenstrahlung unabhängig und kann im Prinzip 24 Stunden täglich aufnehmen.
- c) Die Eindringtiefe von Mikrowellen in die Geländeoberfläche ist i.a. bedeutend größer als die Eindringtiefe von optischer Strahlung. In Abhängigkeit von Wellenlänge und Einfallrichtung der Strahlung sowie von Eigenschaften der Geländeoberfläche erhält man mit Mikrowellen Informationen über eine Oberflächenschicht von einigen Millimetern bis einigen Metern Dicke. Insbesondere können Mikrowellen teilweise auch eine Vegetationsdecke (z.B. einen Waldbestand) durchdringen.
- d) Emission und Reflexion von Mikrowellen werden vor allem von elektrischen Materialeigenschaften beeinflusst, welche durch die relative Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_r$  quantitativ beschrieben werden (vergleiche Abschnitt 2.4). Bei den meisten natürlichen Oberflächen (z.B. Boden, Vegetation) vermitteln Mikrowellen daher insbesondere Information über den Wassergehalt.

Das Mikrowellenspektrum, das sich von 1 mm bis 1 m Wellenlänge (300 GHz bis 300 MHz Frequenz) erstreckt, wird weiter in Bandbereiche unterteilt, deren Grenzen in der Fachliteratur zum Teil sehr unterschiedlich angegeben werden. Tabelle 3.4-2 zeigt eine Liste der üblicherweise verwendeten Bandbezeichnungen, die ursprünglich aus militärischen Sicherheitsgründen gewählt wurden. Fernerkundungs-Mikrowellensysteme arbeiten vor allem im L-Band, C-Band und/oder X-Band.

Bezeichnung	Frequenzbereich	Wellenlängenbereich
P	bis 390 MHz	ab 76.9 cm
L	390 MHz - 1.55 GHz	19.35 cm - 76.9 cm
S	1.55 GHz - 4.20 GHz	7.14 cm - 19.35 cm
C	4.20 GHz - 5.75 GHz	5.22 cm - 7.14 cm
X	5.75 GHz - 10.9 GHz	2.75 cm - 5.22 cm
K	10.9 GHz - 36.0 GHz	8.3 mm - 2.75 cm
Q	36.0 GHz - 46.0 GHz	6.5 mm - 8.3 mm
V	46.0 GHz - 56.0 GHz	5.4 mm - 6.5 mm
W	56.0 GHz - 100 GHz	3.0 mm - 5.4 mm

Tabelle 3.4-2: Mikrowellen-Bandbereiche (nach Ulaby et al., 1981)

Im Mikrowellenbereich dienen Antennen zur Aussendung und zur Sammlung von Strahlung und haben damit dieselbe Funktion wie Linsen im optischen Wellenlängenbereich. Die Analogie geht so weit, daß wir dieselbe Gleichung für das räumliche Auflösungsvermögen (Richtungsauflösungsvermögen) für Linsensysteme und für Antennen verwenden können: Gleichung (3.1-3) gibt die Größe des Beugungsscheibchens bei Abbildung mit einer Linse und damit das Richtungsauflösungsvermögen  $\Delta\alpha$  an. Gemäß Bild 3.4-3 ist

$$(3.1-3) \quad u = k \cdot \frac{f}{d} \cdot \lambda \quad \rightarrow \quad \Delta\alpha = \frac{u}{f} = k \cdot \frac{\lambda}{d} . \quad (3.4-1)$$

$k$  ist eine Konstante, die je nach der genauen Definition des Durchmessers  $u$  des Beugungsscheibchens verschiedene Werte annehmen kann (z.B.  $k = 2.44$ , wenn  $u$  den Durchmesser der ersten Nullstelle im Intensitätsprofil des Beugungsscheibchens angibt, Bild A 3.3-4).

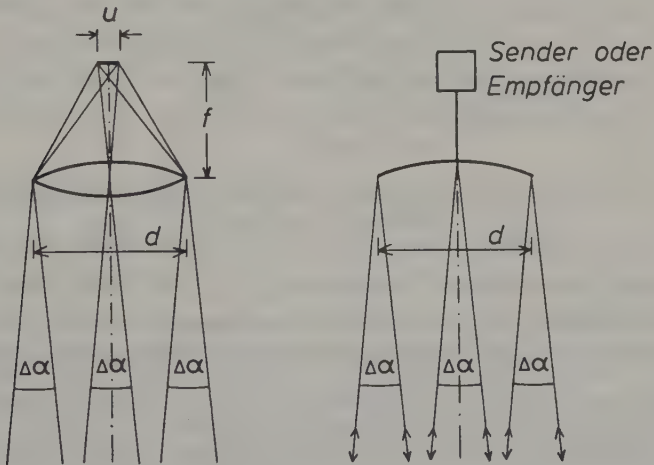


Bild 3.4-3: Räumliches Auflösungsvermögen (Richtungsauflösungsvermögen) einer Linse im optischen Spektralbereich und einer Antenne im Mikrowellenbereich

Diese Gleichung gilt auch für eine Antenne, wobei meist  $k = 1$  gesetzt wird.  $\Delta\alpha$  ist der "Strahlbreitewinkel" (Öffnungswinkel des Antennen-Richtstrahls) und  $d$  ist die Größe der Antenne in jener Richtung, in welcher auch der Strahlbreitewinkel gemessen wird.

Für eine rotationssymmetrische (z.B. paraboloidförmige) Antenne mit dem Durchmesser  $d$  ist daher auch die Richtstrahlcharakteristik rotationssymmetrisch mit dem Öffnungswinkel  $\Delta\alpha$ . Für eine rechteckige Antenne der Länge  $d_1$  und der Breite  $d_2$  mit  $d_1 \gg d_2$  ergibt sich die im Bild 3.4-4 illustrierte Richtstrahlcharakteristik mit den Öffnungswinkeln  $\Delta\alpha_1 \ll \Delta\alpha_2$ .

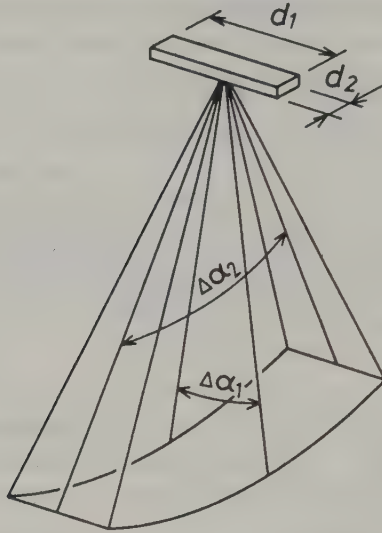


Bild 3.4-4: Richtstrahlcharakteristik einer rechteckigen (stabförmigen) Antenne

Im Vergleich zum optischen Spektralbereich ist das erreichbare räumliche Auflösungsvermögen von Mikrowellensystemen wegen der großen Wellenlänge  $\lambda$  gemäß (3.4-1) bei einer realistischen Antennengröße bedeutend schlechter.

Beispiel: Man berechne den Strahlbreitewinkel  $\Delta\alpha$  eines Mikrowelleninstruments mit einer Parabolantenne von 1 m Durchmesser, das im X-Band bei 6.6 GHz arbeitet. Wie groß ist das erfaßte Gelände-Flächenelement, wenn das Instrument auf einem Satelliten in 1000 km Höhe eingesetzt wird?

(2.2-2)  
Lösung:  $\lambda = \frac{c}{\nu} = 4.55 \text{ cm}; \quad \Delta\alpha = \frac{4.55}{100} = 45.5 \text{ mrad} \hat{=} 2.61^\circ;$

Durchmesser des Gelände-Flächenelements  $D = 0.0455 \cdot 1000 \text{ km} = 45.5 \text{ km}$ .

Passive Mikrowellensysteme werden Mikrowellenradiometer genannt.

Bei aktiven Mikrowellensystemen unterscheidet man abbildende RADAR-Systeme (Seitensicht-RADAR), deren Hauptzweck die Herstellung von Bildern der Geländeoberfläche für geometrische Auswertungen sowie für qualitative Interpretationen ist, weiters Scatterometer, welche quantitative Daten über das

Reflexionsvermögen (Rückstreuvermögen) der Geländeoberfläche liefern, sowie RADAR-Altimeter, welche die Entfernung der rückstreuenden Objekte und damit die Höhe des Sensors über der Erdoberfläche mit hoher Genauigkeit messen. Scatterometer können, müssen aber nicht die räumliche Verteilung des Rückstreuvermögens erfassen, d.h. Bilder der Geländeoberfläche herstellen. Entsprechend kalibrierte abbildende RADAR-Systeme können auch als Scatterometer verwendet werden, liefern aber meist weniger genaue Daten über das Rückstreuvermögen als die speziell für diesen Zweck optimierten Scatterometer.

In diesem Buch beschränken wir uns auf die Diskussion von Mikrowellenradiometern und von Seitensicht-RADAR-Systemen.

### 3.4.2 Mikrowellen-Radiometer

Mikrowellen-Radiometer messen die von der Geländeoberfläche und/oder von der Atmosphäre infolge ihrer Eigenwärme emittierte Mikrowellenstrahlung. Lassen wir zunächst den Einfluß der Atmosphäre außer Acht, so ist das vom Mikrowellen-Radiometer empfangene Signal proportional zur Strahldichte der Geländeoberfläche und damit gemäß (2.6-3) und (2.6-6) proportional zu

$$L_{\lambda}(T) = \epsilon(\lambda) \cdot \frac{2c \cdot k}{\lambda^4} \cdot T \quad (3.4-2)$$

Die Hauptschwierigkeit der Mikrowellenradiometrie liegt darin, daß diese Signale äußerst schwach sind.

Beispiel: Ein Mikrowellenradiometer mit einer quadratischen Antenne der Seitenlänge  $d$  messe aus der Höhe  $h$  die von einer Geländeoberfläche des Emissionsvermögens  $\epsilon = 1$  (schwarzer Körper) und der Temperatur  $T = 300$  K ausgesendete Strahlung. Die Bandbreite des Radiometers sei  $\Delta\nu = 100$  MHz, d.h. das Radiometer sei für Strahlung innerhalb eines Frequenzintervalls der Breite  $\Delta\nu$  empfindlich. Man berechne den vom Radiometer empfangenen Strahlungsfluß  $\Phi_p$  sowie die Änderung dieses Signals bei einer Temperaturänderung  $\Delta T = 1$  K.

Bezeichnen wir die lineare Ausdehnung des von der Antenne erfaßten Gelände-Flächenelements mit  $A$  und den Raumwinkel, unter dem die Antenne vom Boden aus gesehen wird, mit  $\Omega$  (Bild 3.4-5), so gilt



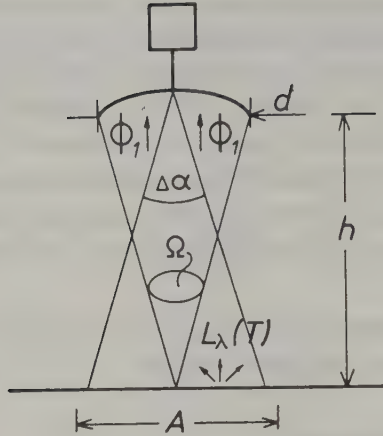


Bild 3.4-5: Zur Ableitung des von einem Mikrowellenradiometer empfangenen Strahlungsflusses

$$(3.4-1) \quad A = h \cdot \Delta\alpha^2 = h \cdot \frac{\lambda}{\alpha}, \text{ wobei in (3.4-1) } k = 1 \text{ gesetzt wurde.}$$

$$\Omega = \frac{d^2}{h^2}$$

$$\dot{\Phi} = L_{\lambda}(T) \cdot \Delta\lambda \cdot A^2 \cdot \Omega = L_{\lambda}(T) \cdot \Delta\lambda \cdot h^2 \cdot \frac{\lambda^2}{d^2} \cdot \frac{d^2}{h^2} = L_{\lambda}(T) \cdot \Delta\lambda \cdot \lambda^2$$

$\Delta\lambda$  ist hier das Wellenlängenintervall, das der Bandbreite  $\Delta\nu$  entspricht:

$$\Delta\lambda = \left| \frac{d\lambda}{d\nu} \right| \Delta\nu = \left( \frac{\lambda=c}{\nu} \right) \frac{c}{\nu^2} \Delta\nu = \frac{\lambda^2}{c} \Delta\nu$$

Damit wird

$$\dot{\Phi} = L_{\lambda}(T) \cdot \frac{\lambda^4}{c} \Delta\nu = \epsilon(\lambda) \cdot 2 \cdot k \cdot T \cdot \Delta\nu. \quad (3.4-2)$$

Es ist nun zu beachten, daß ein schwarzer Körper nichtpolarisierte Strahlung aussendet, während die Antenne nur Strahlung einer einzigen Polarisationsrichtung aufnimmt.<sup>1</sup> Die Leistung  $\dot{\Phi}_p$  der Strahlung einer bestimmten Polarisationsrichtung ist genau die Hälfte der Leistung der nichtpolarisierten Strahlung:

<sup>1</sup> Elektromagnetische Strahlung kann gemäß Bild 2.2-1 als Energieausbreitung in Form transversaler Wellen aufgefaßt werden, da die Vektoren der elektrischen und der magnetischen Feldstärke senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung stehen. Bleibt die Richtung des elektrischen Feldstärkevektors konstant, so spricht man von (linear) polarisierter Strahlung. Ändert sich die Richtung des elektrischen Feldstärkevektors unregelmäßig, wobei die einzelnen auf die Fortpflanzungsrichtung senkrecht stehenden Richtungen im Durchschnitt mit gleicher Häufigkeit auftreten, so handelt es sich um nicht polarisierte Strahlung.

$$\dot{\Phi}_p = \frac{1}{2} \dot{\Phi} = \epsilon(\lambda) \cdot k \cdot T \cdot \Delta\nu. \quad (3.4-3)$$

Mit  $\epsilon = 1$ ,  $\Delta\nu = 100$  MHz,  $T = 300$ K und  $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  W·s·K<sup>-1</sup> (siehe Gleichung (2.6-2b)) wird  $\dot{\Phi}_p = 4.14 \cdot 10^{-13}$  W.

Für die Signaländerung bei einer Temperaturänderung von 1K erhalten wir  $\Delta\dot{\Phi}_p = k \cdot \Delta\nu \cdot \Delta T = k \cdot \Delta\nu = 1.38 \cdot 10^{-15}$  W.

Diese Signale sind weitaus schwächer als das übliche Rauschen von Mikrowellenempfängern.

Durch geeignete Konstruktion der Mikrowellenempfänger und insbesondere durch Integration der Signale über Zeitintervalle von typischerweise 0.01 bis 1 Sekunde gelingt es aber doch, eine "rauschäquivalente Temperaturänderung" (vergl. Kap. 3.2.1.3) von 1K und darunter zu erreichen.

An Gleichung (3.4-3) ist bemerkenswert, daß der empfangene Strahlungsfluß unabhängig von der Größe der Antenne ist! Die Antennengröße beeinflusst nur das räumliche Auflösungsvermögen des Mikrowellenradiometers. Beim Vergleich mit einem Abtaster im optischen Wellenlängenbereich (Gleichung (3.2-28)) zeigt sich, daß die strahlungssammelnde Wirkung von Mikrowellenradiometer und optischem Abtaster gleich ist, wenn wir beim optischen Abtaster einen Detektor in der Größe des Auflösungsvermögens  $u$  (Gleichung (3.4-1)) annehmen!

Mikrowellenradiometer können auch als abtastende Systeme ausgeführt sein (scanning microwave radiometer) (siehe z.B. Nimbus-Satelliten, Abschnitt 4.2.6). Die Abtastung kann mechanisch durch Schwenken der Antenne oder aber elektronisch durch relative Phasenverschiebung einzelner Antennenbereiche (phased antenna arrays) erfolgen. Neben der vom optisch-mechanischen Abtaster her bekannten zeilenweisen Abtastung (Bild 3.4-6a) wird manchmal eine konische Abtastung (Bild 3.4-6b) verwendet. Dabei werden alle Geländeoberflächenelemente unter konstantem Zenitwinkel gesehen, was wegen des oft stark richtungsabhängigen Emissionsvermögens der Oberflächen vorteilhaft ist.

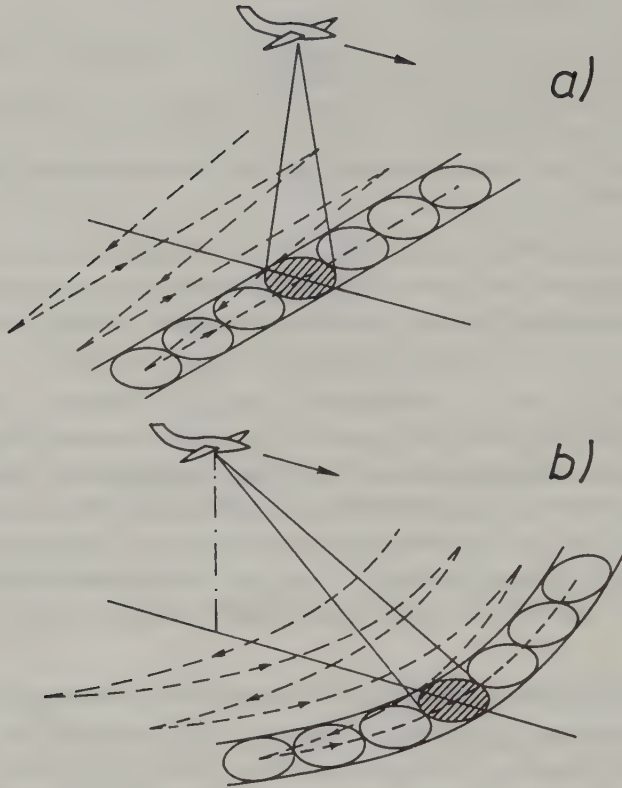


Bild 3.4-6: Abtastende Mikrowellenradiometer mit zeilenweiser (a) und konischer (b) Abtastung (nach Ulaby et al., 1981)

Wie schon im Kapitel 2.6 erwähnt wurde, ist der Emissionsgrad  $\epsilon(\lambda)$  der meisten Körper im Mikrowellenbereich wesentlich von 1 verschieden und wirkt sich kritisch auf die aus dem Radiometer-Signal abgeleitete Geländetemperatur  $T$  aus (vergl. Aufgabe 2.6-2). Das vorrangige Ziel der Mikrowellen-Radiometrie ist dementsprechend meist nicht die exakte Bestimmung von Geländeoberflächentemperaturen, sondern vielmehr die Abgrenzung und Identifizierung unterschiedlicher Oberflächenarten auf Grund unterschiedlichen Emissionsvermögens  $\epsilon(\lambda)$ .

Das Emissionsvermögen  $\epsilon(\lambda)$  hängt von der Oberflächenbeschaffenheit sowie von der inneren Struktur und den Materialeigenschaften der oberflächennahen Schicht einer bestimmten Dicke (Eindringtiefe) ab und ist eine i.a. komplizierte Funktion der Frequenz (Wellenlänge), der Beobachtungsrichtung (des

Zenitwinkels) sowie der Polarisationsrichtung, die als "vertikale" bzw. "horizontale" Polarisation gemäß Bild 3.4-7 definiert ist. Die sowohl für die Dicke der emittierenden Schicht (Eindringtiefe) als auch für das Emissionsvermögen selbst entscheidende Materialeigenschaft ist die komplexe relative Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_r = \epsilon_r' - i\epsilon_r''$ . Diese Größe ist für den Spezialfall transparenten Materials (unendlich großer Eindringtiefe) reelle ( $\epsilon_r'' = 0$ ) und wurde in dieser Form schon in Kapitel 2.4 erwähnt. Der Imaginärteil  $\epsilon_r''$  ist ein Maß für die (ebenfalls frequenzabhängige) elektrische Leitfähigkeit des Materials. Für die meisten in der Natur vorkommenden trockenen Stoffe liegt  $\epsilon_r'$  im Bereich zwischen etwa 1.5 und 10, während  $\epsilon_r''$  sehr klein ( $< 0.1$ ) ist. Für Wasser sind jedoch  $\epsilon_r'$  und  $\epsilon_r''$  gemäß Bild 3.4-8 bedeutend größer. Insbesondere steigt  $\epsilon_r''$  mit dem Salzgehalt des Wassers bei nicht zu hohen Frequenzen stark an (elektrische Leitfähigkeit!).

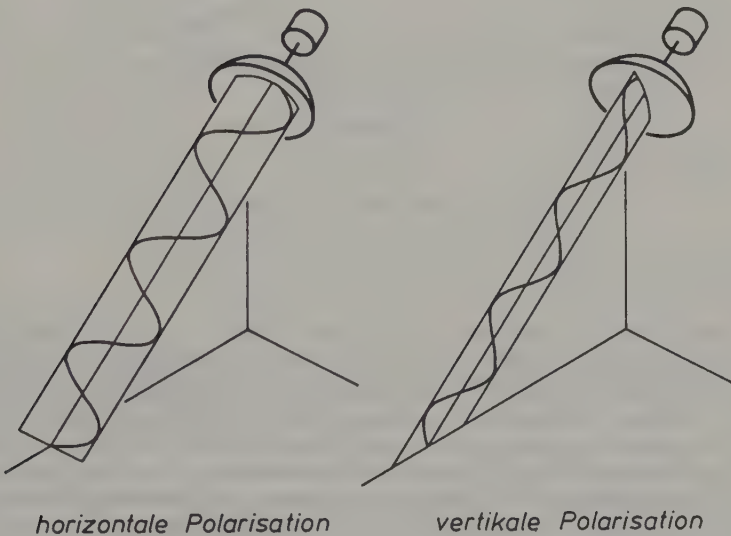


Bild 3.4-7: Polarisationsrichtungen bei Mikrowellensystemen

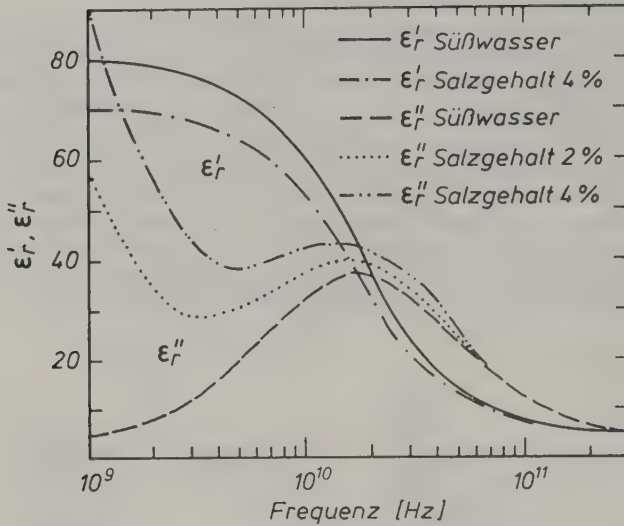


Bild 3.4-8: Realteil  $\epsilon'_r$  und Imaginärteil  $\epsilon''_r$  der relativen Dielektrizitätskonstanten von Wasser unterschiedlichen Salzgehalts (nach Schanda, 1976)

In grob vereinfachender Zusammenfassung gelten folgende Gesetzmäßigkeiten:

- Die Eindringtiefe (Dicke der Schicht, deren Temperatur die emittierte Strahlung beeinflusst) nimmt mit zunehmender Leitfähigkeit (steigendem  $\epsilon''_r$ , d.h. zunehmendem Wassergehalt) ab, da die Mikrowellen durch "Wirbelstromverluste" gedämpft werden. Die Eindringtiefe nimmt auch mit zunehmender Frequenz (abnehmender Wellenlänge) der Mikrowellenstrahlung ab. Diese Zusammenhänge können aus Bild 3.4-9 abgelesen werden. Typische Eindringtiefen von Mikrowellen des Frequenzbereichs 1 - 20 GHz (d.h. des Wellenlängenbereichs 30 cm bis 1.5 cm) sind in Süßwasser Bruchteile eines Millimeters bis einige Zentimeter, in reinem Eis 1 m bis 100 m, in Meereis einige Zentimeter bis etwa 1 m, in trockenem Boden wenige Zentimeter bis wenige Meter, in feuchtem Boden wenige Millimeter bis einige Zentimeter, in Vegetation bis mehrere Meter.
- Der Emissionsgrad  $\epsilon$  nimmt mit zunehmender relativer Dielektrizitätskonstante (sowohl  $\epsilon'_r$  als auch  $\epsilon''_r$ ) ab. Als Plausibilitätserklärung bzw. Merkhilfe sei hier nur darauf hingewiesen, daß eine Zunahme von  $\epsilon'_r$  gemäß (2.4-2) auch eine Zunahme des Brechungsindex bedeutet. Eine Zunahme des Brechungsindex eines Körpers hat aber eine Erhöhung des Reflexionsgrades  $\rho$  seiner Oberfläche zur Folge. Ebenso verursacht ein großes  $\epsilon''_r$  einen hohen Reflexionsgrad (Spiegelung an Metalloberflächen!). Je höher der Reflexionsgrad, desto niedriger ist jedoch nach (2.6-4) das Emissionsvermögen, was zu "beweisen" war. Bild 3.4-9 gibt als Beispiel das Emissionsvermögen von glatten Oberflächen in eine Richtung senkrecht auf die Oberfläche an. Man erkennt unter Heranziehung der obigen Angaben für  $\epsilon'_r$  und  $\epsilon''_r$  natürlicher Stoffe, daß das Emissionsvermögen der meist trockenen Oberflächen größer als ungefähr 0.85 ist, während Wasser je nach Fre-



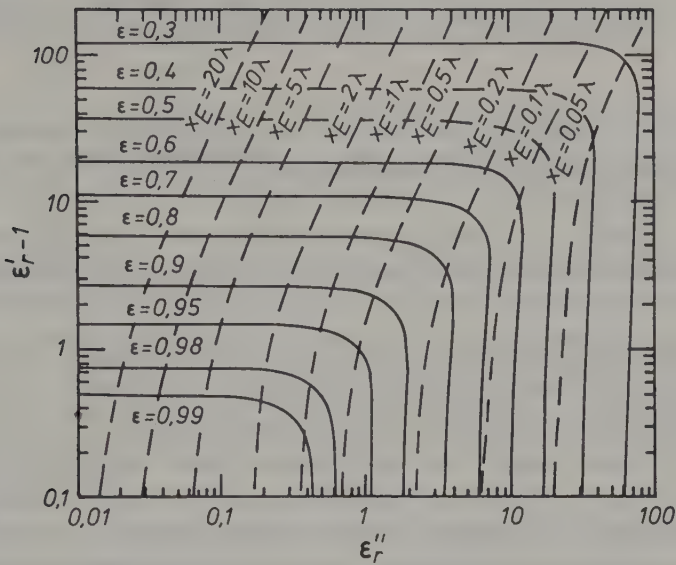


Bild 3.4-9: Emissionsvermögen  $\epsilon$  und Eindringtiefe  $x_E$  für eine glatte Oberfläche in senkrechter Richtung (nach Schanda, 1976)

quenz und Salzgehalt ein Emissionsvermögen von unter 0.3 haben kann! Das Emissionsvermögen natürlicher Stoffe ist dementsprechend wesentlich durch ihren Wassergehalt bestimmt.

- c) Der Emissionsgrad  $\epsilon$  glatter Oberflächen ändert sich mit dem Beobachtungswinkel. Der Emissionsgrad ist für horizontale Polarisierung im allgemeinen bedeutend kleiner als für vertikale Polarisierung.
- d) Mit zunehmender Oberflächenrauigkeit steigt der Emissionsgrad. (Der Reflexionsgrad nimmt infolge von Vielfachreflexionen ab!)
- e) Bei inhomogenen Stoffen (Boden, Vegetation) hängt das Emissionsvermögen in komplizierter Weise von den komplexen Dielektrizitätskonstanten  $\epsilon_r$  der Komponenten sowie von deren Mischungsverhältnis und Verteilung (Korngröße, Vorzugsorientierungen usw.) ab.

Wir haben bereits im Kapitel 2.6 die Strahlungstemperatur  $T_{\text{str}}$  einer Oberfläche (eines Körpers) als jene fiktive Temperatur definiert, die man durch Messung der emittierten Strahlung unter Annahme  $\epsilon = 1$  (schwarzer Körper) erhält, und den einfachen Zusammenhang  $T_{\text{str}} = \epsilon \cdot T$  (Gleichung (2.6-7)) formuliert.

Beispiel: Man ermittle die Strahlungstemperatur einer glatten Süßwasser-oberfläche und einer glatten Meerwasseroberfläche der wahren Temperatur 20°C bei  $\lambda = 1.5 \text{ cm}$  und bei  $\lambda = 30 \text{ cm}$  unter Verwendung der Diagramme 3.4-8 und 3.4-9.

Lösung:

	Süßwasser		Meerwasser (4% Salzgehalt)	
	$\lambda=1.5\text{cm}(\nu=20\text{GHz})$	$\lambda=30\text{cm}(\nu=1\text{GHz})$	$\lambda=1.5\text{cm}(\nu=20\text{GHz})$	$\lambda=30\text{cm}(\nu=1\text{GHz})$
$\epsilon'_r$	38	80	32	70
$\epsilon''_r$	38	4.2	41	90
$\epsilon$	0.40	0.36	0.39	0.29
$T_{\text{str.}}$	117.3K $\hat{=}$ -155.9°C	105.6K $\hat{=}$ -167.6°C	114.3K $\hat{=}$ -158.9°C	85.0K $\hat{=}$ -188.2°C

Wir berücksichtigen schließlich noch den Einfluß der Atmosphäre auf das Mikrowellen-Radiometer-Signal. Dieser Einfluß ist, in Analogie zu den Verhältnissen im Bereich thermischen Infrarots (siehe Abschnitt 3.2.1.4), ein dreifacher: Erstens wird die von der Geländeoberfläche emittierte Strahlung beim Durchgang durch die Atmosphäre abgeschwächt (Strahlungsfluß  $\dot{\Phi}_1$ ), zweitens emittiert die Atmosphäre infolge ihrer Eigenwärme selbst Strahlung nach oben zum Sensor hin (Strahlungsfluß  $\dot{\Phi}_2$ ) und drittens emittiert die Atmosphäre Strahlung nach unten. Diese wird vom Gelände reflektiert und erreicht so ebenfalls den Sensor (Strahlungsfluß  $\dot{\Phi}_3$ ).

Es sei hier an Hand eines stark vereinfachten Modells nur angedeutet, wie das Problem quantitativ zu behandeln ist: Wir nehmen eine homogene, glatte Geländeoberfläche mit der wahren Temperatur  $T_G$  und einem Emissionsgrad  $\epsilon_G$  (Reflexionsgrad  $\rho_G = 1 - \epsilon_G$ ) sowie eine nicht streuende Atmosphäre der einheitlichen wahren Temperatur  $T_L$  an. Der Transmissionsgrad der gesamten Atmosphärenschicht von der Geländeoberfläche bis zum Sensor bei vertikalem Strahlungspfad sei  $\tau_L$ . Der Emissionsgrad der Atmosphäre ist daher  $\epsilon_L = 1 - \tau_L$  (siehe Gleichung (2.6-4a)).

Die oben definierten Strahlungsflüsse sind nun

$$\begin{aligned}
 \dot{\Phi}_1 &= \epsilon_G \cdot k \cdot T_G \cdot \Delta\nu \cdot \tau_L \\
 \dot{\Phi}_2 &= \epsilon_L \cdot k \cdot T_L \cdot \Delta\nu = (1 - \tau_L) \cdot k \cdot T_L \cdot \Delta\nu \\
 \dot{\Phi}_3 &= \dot{\Phi}_2 \cdot \rho_G \cdot \tau_L = (1 - \tau_L) \cdot k \cdot T_L \cdot \Delta\nu (1 - \epsilon_G) \cdot \tau_L
 \end{aligned}
 \tag{3.4-4}$$

und in Summe

$$\dot{\Phi}_A = \dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2 + \dot{\Phi}_3 = (\epsilon_G \cdot \tau_L [T_G - T_L (1 - \tau_L)] + T_L (1 - \tau_L^2)) \cdot k \cdot \Delta\nu$$

Diesem Gesamtstrahlungsfluß entspricht eine Strahlungstemperatur ("Antennentemperatur")

$$T_A = \frac{\frac{1}{2} A}{k \cdot \Delta \nu} = \epsilon_G \cdot \tau_L (T_G - T_L (1 - \tau_L)) + T_L (1 - \tau_L^2) \quad (3.4-5)$$

Man erkennt nun deutlich die Beeinflussung der gemessenen Strahlungstemperatur  $T_A$  durch die Atmosphäre in Abhängigkeit von deren Transmissionsgrad: Für  $\tau_L = 1$  wird  $T_A = \epsilon_G \cdot T_G$ , d.h. es wird die Strahlungstemperatur der Geländeoberfläche gemessen. Andererseits ergibt sich für den Grenzfall  $\tau_L = 0$  die gemessene Strahlungstemperatur  $T_A = T_L$ , d.h. die Geländeoberfläche hat keinen Einfluß mehr auf das Meßsignal. Erweitert man das hier zugrundgelegte einfache Modell einer isothermen Atmosphäre auf den Fall einer beliebigen vertikalen Temperaturverteilung, so erkennt man, daß ein Mikrowellenradiometer umso tiefer in die Atmosphäre "hineinsieht", d.h. die Temperatur von umso tiefer liegenden Schichten mißt, je höher der Transmissionsgrad der Atmosphäre ist.

Bild 3.4-10 zeigt den frequenzabhängigen Transmissionsgrad bzw. die frequenzabhängige Opazität der Atmosphäre mit und ohne Wasserdampf.

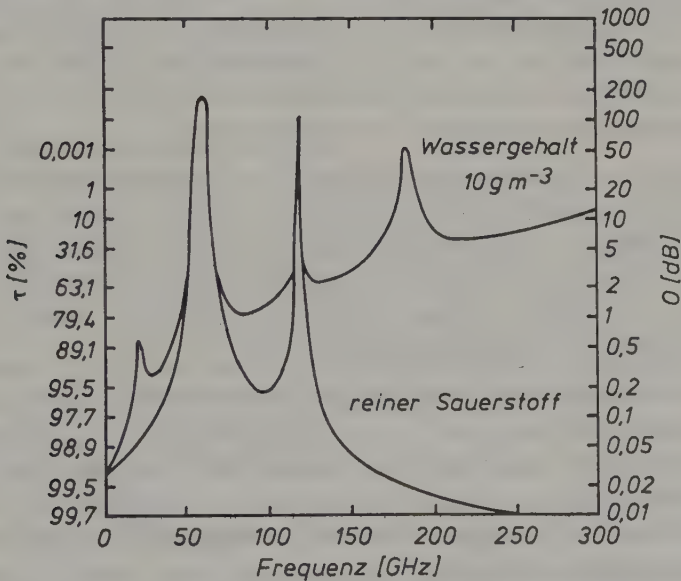


Bild 3.4-10: Transmissionsgrad der Atmosphäre bei senkrechtem Strahlungspfad im Mikrowellenbereich (nach Ulaby et al., 1986)

Die Opazität ist der Kehrwert des Transmissionsgrades (siehe 3.1.1.4.2) und wird in der Mikrowellentechnik in Dezibel (dB) angegeben, wobei allgemein für eine Verhältniszahl  $x$  gilt:

$$x[\text{dB}] = 10 \cdot \log x \quad (3.4-6)$$

und speziell für die Opazität gilt:

$$\text{Opazität} [\text{dB}] = 10 \cdot \log \frac{1}{\tau} \quad (3.4-7)$$

Der Zusammenhang zwischen  $\tau$  in Prozent und der Opazität in dB ist aus der doppelten Skalierung in Bild 3.4-10 zu ersehen!

Die ausgeprägten Absorptionsbanden und -linien kommen durch Energieaustausch mit den Molekülrotationsniveaus (siehe Kapitel 2.4) von Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ) bei 60 GHz und bei 118 GHz sowie von Wasserdampf bei 22 GHz und bei 183 GHz zustande.

Mißt nun ein Mikrowellenradiometer aus einem Satelliten die nach oben emittierte Strahlung in mehreren Frequenzkanälen in wachsendem Abstand von einem Sauerstoff-Absorptionsmaximum, d.h. in Frequenzkanälen zunehmender atmosphärischer Transmission, so enthalten diese Messungen Information über die Temperatur in Atmosphärenschichten abnehmender Höhe. Durch geeignete Auswerteverfahren ("Inversionsmethoden") kann man daraus vertikale Temperaturprofile der Atmosphäre ermitteln. In ähnlicher Weise gelingt es, aus Mikrowellenmessungen in der Nähe der Wasserdampfabsorptionen den gesamten Wasserdampfgehalt einer vertikalen Luftsäule abzuschätzen und auch vertikale Wasserdampf-Konzentrations-Profile zu berechnen.

Abschließend seien die wichtigsten praktischen Anwendungen der Mikrowellen-Radiometrie aufgelistet. Die meisten davon können von Satelliten aus (bei Bodenauflösungen in der Größenordnung von Zehnerkilometern) durchgeführt werden, mit Ausnahme einiger Anwendungen über Land, für welche die höhere räumliche Auflösung von Flugzeug-Mikrowellenradiometern nötig sein kann, die typischerweise im Zehnermeterbereich liegt:

- Identifizierung und Kartierung von Wasserflächen, Kartierung überschwemmter Gebiete,
- Kartierung der Schneebedeckung, einschließlich Ermittlung des Wassergehalts des Schnees,
- Kartierung der Bodenfeuchtigkeit als Voraussetzung für Erntevorhersagen und Bewässerungskontrollen,
- Meereiskartierung,
- Feststellung der Windgeschwindigkeit über dem Ozean (auf Grund der Meereswellen (Oberflächenrauigkeit) und des dadurch beeinflussten Emis-

sionsvermögens),

- Kartierung der Meeresoberflächentemperatur,
- Kartierung des Salzgehalts der Meere,
- Überwachung von Ölverschmutzungen,
- Verfolgung tropischer Wirbelstürme (auf Grund von Niederschlagsverteilung, Temperatur- und Wasserdampfprofilen der Atmosphäre, Meeresoberflächentemperatur und Windgeschwindigkeit über dem Meer),
- Messung von Temperaturprofilen, Wasserdampfgehalt und Wasserdampfprofilen sowie Gehalt an flüssigem Wasser (Regen) in der Atmosphäre für meteorologische und klimatologische Vorhersagen und Untersuchungen.

Weiterführende Literatur: Schanda (1976), Schanda (1986), Ulaby et al. (1981 - 1986).

### 3.4.3 Aktive Mikrowellensysteme (RADAR)

Der Begriff RADAR ist eine Abkürzung von Radio Detection and Ranging (Funkermittlung und -entfernungsmessung). RADAR-Systeme wurden ursprünglich vor allem für Navigationszwecke im Schiffsverkehr und im Flugverkehr verwendet. Im folgenden beschäftigen wir uns ausschließlich mit sogenannten Seitensicht-RADAR-Systemen (side-looking RADAR), die vom Flugkörper aus Bilder der Erdoberfläche aufnehmen.

#### 3.4.3.1 Prinzip des Seitensicht-RADARs

Das RADAR-Gerät besteht aus einer außen am Flugkörper (z.B. Flugzeug) montierten Antenne, einem Sender, einem Empfänger, einem Schalter, der die Antenne wechselweise auf Sendung und auf Empfang schaltet, sowie einer Registriereinheit (z.B. einem Magnetbandgerät) zur Aufzeichnung der aufgenommenen Signale. Die stabförmige Antenne ist mit ihrer Längsachse in Flugrichtung orientiert und zeigt mit ihrer Sende- bzw. Empfangsrichtung senkrecht zur Flugbahn schräg nach unten (Bild 3.4-11). Der Strahlbreitewinkel  $\Delta\alpha_x$  ist klein und der Strahlbreitewinkel  $\Delta\alpha_y$  ist groß (siehe Gleichung (3.4-1) bzw. Bild 3.4-4), sodaß die Richtstrahlcharakteristik der Antenne einen schmalen, zeilenförmigen Geländeausschnitt erfaßt. Die Antenne sendet nun einen kurzen Mikrowellenimpuls der Dauer von etwa 100 ns aus. Die einzelnen Teile des zeilenförmigen Geländeausschnitts reflektieren diesen Impuls mehr oder weniger diffus in alle Richtungen, sodaß ein Teil des reflektierten Signals zurück in Richtung zur Antenne fällt. Diese ist in der Zwischenzeit auf Empfang geschaltet worden und registriert das Impulsecho als Funktion



der Zeit. Je kleiner die Entfernung eines zurückstreuenden Geländeteils innerhalb des zeilenförmigen Geländeausschnitts ist, desto eher wird das zugehörige Echosignal beim Sensor eintreffen. Die zeitliche Funktion des Echosignals gibt damit die eindimensionale räumliche Verteilung des Rückstreuungsvermögens entlang der Geländezeile an. Nach einem gewissen Zeitintervall wird die Antenne wieder auf Sendung geschaltet und ein neuer Impuls ausgestrahlt. Der Flugkörper hat sich in der Zwischenzeit weiterbewegt, so daß eine neue Geländezeile erfaßt wird, die parallel zur vorherigen Zeile, aber in Flugrichtung versetzt liegt. Im Laufe der Zeit wird auf diese Weise ein neben der Nadirlinie der Flugbahn liegender Geländestreifen der Breite  $S$  (Bild 3.4-11) zeilenweise erfaßt.

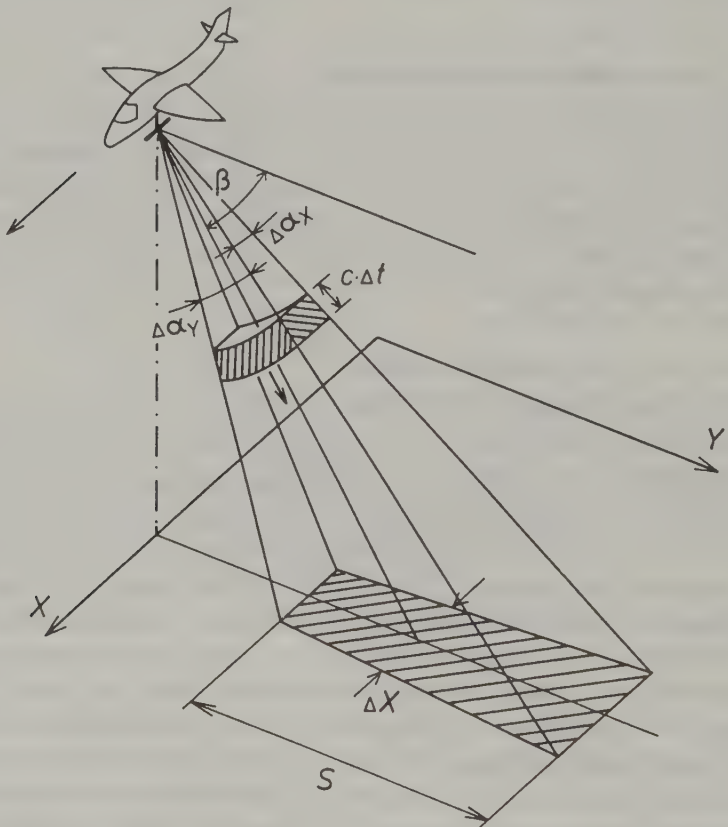


Bild 3.4-11: Prinzip des Seitensicht-RADARS

Die Bildelementgröße auf der Geländeoberfläche ist in Flugrichtung

$$\Delta X = R \cdot \Delta \alpha_X \stackrel{(3.4-1)}{=} R \cdot \frac{\lambda}{l} = \frac{h \cdot \lambda}{l \cdot \sin \beta} \quad (3.4-8)$$

R ist hier die Schrägdistanz vom Sensor zum Geländepunkt, h ist die Flughöhe,  $\beta$  ist der "Depressionswinkel" und l ist die Länge der Antenne. Die Bildelementgröße in Flugrichtung ist also abhängig von der Länge der Antenne und nimmt linear mit der Schrägentfernung zu.

Die Schrägdistanz R ergibt sich aus der Laufzeit t des Signals:

$$R = \frac{c \cdot t}{2} \quad (3.4-9)$$

c ist hier die Lichtgeschwindigkeit. Der Faktor 2 im Nenner ist dadurch bedingt, daß der Impuls die Strecke R in der Zeit t hin und zurück, also zweimal zu durchlaufen hat. Mit einer Impulslänge  $\Delta t$  ergibt sich damit ein kleinster noch aufzulösender Schrägabstand zweier Geländepunkte:

$$\Delta R = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \quad (3.4-10)$$

Dem liegt die Forderung zugrunde, daß sich die Echoimpulse der beiden Geländepunkte zeitlich nicht überlappen dürfen. Die Bildelementgröße senkrecht zur Flugrichtung ist daher:

$$\Delta Y = \frac{\Delta R}{\cos \beta} = \frac{c \cdot \Delta t}{2 \cos \beta} \quad (3.4-11)$$

$\Delta Y$  ist im wesentlichen durch die Impulslänge bestimmt und unabhängig von der Flughöhe.

In Gleichung (3.4-11) kommt auch quantitativ zum Ausdruck, daß das RADAR-System nur bei Seitensicht Bilder der Erdoberfläche liefern kann: Für Geländeteile direkt unter dem Flugkörper ist  $\beta = 90^\circ$ , also  $\cos \beta = 0$  und damit  $\Delta Y \rightarrow \infty$ . In der Umgebung der Nadirlinie entsteht daher kein räumlich aufgelöstes Bild des Geländes, da die Laufzeit der Mikrowellenimpulse praktisch unabhängig von der Lage der rückstreuenden Objekte wird.

**Beispiel:** Man berechne die räumliche Auflösung (Gelände-Bildelementgröße) eines Seitensicht-RADAR-Systems, das im C-Band mit der Frequenz  $\nu = 5$  GHz arbeitet. Die Länge der Antenne sei  $l = 5$  m, die Impulsdauer  $\Delta t = 100$  ns und der Depressionswinkel  $\beta = 30^\circ$ . Das System werde einerseits im Flugzeug bei einer Flughöhe  $h = 3$  km, andererseits im Satellit bei einer Flughöhe  $h = 800$  km eingesetzt.

Lösung:  $\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3 \cdot 10^{10}}{5 \cdot 10^9} = 6 \text{ cm}$

a)  $\Delta X = \frac{h \cdot \lambda}{l \cdot \sin \beta} = \frac{3000 \cdot 0.06}{5 \cdot 0.5} = 72 \text{ m}; \quad \Delta Y = \frac{c \cdot \Delta t}{2 \cos \beta} = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 0.866} = 17.3 \text{ m}$   
b)  $\Delta X = \frac{h \cdot \lambda}{l \cdot \sin \beta} = \frac{800 \cdot 0.06}{5 \cdot 0.5} = 19.2 \text{ km}; \quad \Delta Y = 17.3 \text{ m}$

Die räumliche Auflösung senkrecht zur Flugrichtung (Entfernungsauflösung) ist unabhängig von der Flughöhe und insbesondere für ein Satelliten-Bild-aufnahmesystem ausgezeichnet! Die Schwachstelle des Seitensicht-RADARs ist offensichtlich die räumliche Auflösung in Flugrichtung (bedingt durch die Winkelauflösung der Antenne), welche bei realistischer Antennenlänge äußerst bescheiden und beim Einsatz in Satelliten unakzeptabel ist.

Im folgenden werden wir sehen, wie die räumliche Auflösung in Flugrichtung durch Anwendung des Prinzips der synthetischen Apertur (synthetic aperture RADAR, SAR) entscheidend verbessert werden kann.

#### 3.4.3.2 Seitensicht-RADAR mit synthetischer Apertur (SAR)

Ein Gedankenexperiment soll die Wirkungsweise eines SAR-Systems plausibel machen. Wir nehmen zunächst ein Seitensicht-RADAR-System mit einer Antenne der Länge  $L$  an, die so groß sei, daß die gewünschte Winkelauflösung (räumliche Auflösung in Flugrichtung) erreicht wird. (Um mit dem im obigen Beispiel angeführten System eine Bodenauflösung von 20 m aus der Satellitenhöhe  $h = 800 \text{ km}$  zu erreichen, müßte z.B.  $L = 4.8 \text{ km}$  sein, was natürlich unrealistisch ist.) Wir stellen uns nun vor, daß die Antenne nicht in einem Stück gefertigt ist, sondern aus vielen kurzen Antennen der Länge  $l$  bestehe, die, aneinandergelegt, die Antenne der gewünschten Länge  $L$  ergeben. Wenn nun jede kurze Antenne zu einem eigenen RADAR-System gehört und nicht nur die Intensität des Impulsechos, sondern auch dessen Phase aufgezeichnet, dann enthält die Gesamtheit der Aufzeichnungen aller "kurzen" RADAR-Systeme sicher jede Information, die ein RADAR-System mit einer Antenne der Länge  $L$  liefern könnte. (Amplitudenverteilung (Intensitätsverteilung) und Phasenverteilung kennzeichnen ein Wellenfeld vollständig; mehr Information ist im RADAR-Echo nicht enthalten!) Durch geeignete simultane Auswertung aller Daten der "kurzen" RADAR-Systeme muß es also möglich sein, dasselbe zu erreichen wie mit einer langen Antenne, d.h. Bilder der gewünschten hohen räumlichen Auflösung herzustellen. Eine quantitative Analyse zeigt sogar, daß die räumliche Auflösung bei Verwendung der kurzen Antennen um einen Faktor 2 besser ist (siehe Bild 3.4-12): Statt  $\Delta X = R \cdot \lambda / L$  (Gleichung (3.4-8)) erhält man

$$\Delta X = \frac{R \cdot \lambda}{2 L}$$

(3.4-12)

Der Grund für die Verbesserung um den Faktor 2 liegt gemäß Bild 3.4-12 in folgendem: Im Fall a) (eine lange Antenne) "sieht" das obere Ende der Antenne die beiden rückstreuenden Punkte 1 und 2 mit einer Phasendifferenz, die proportional der Wegdifferenz ( $R_1 - R_2$ ) der beiden Echos ist. Im Fall b) (viele kurze Antennen) "sieht" die oberste kurze Antenne die beiden rückstreuenden Punkte 1 und 2 mit einer Phasendifferenz proportional zu  $2(R_1 - R_2)$  der Echos, da hier auch die Aussendung des Impulses ausschließlich durch die entsprechende kurze Antenne erfolgt!

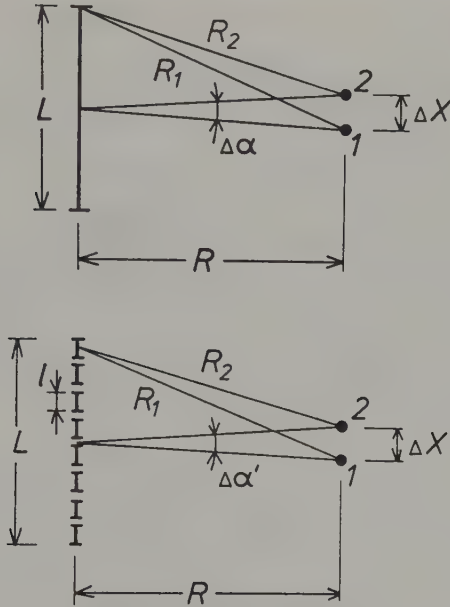


Bild 3.4-12: Zum räumlichen Auflösungsvermögen des SAR

Es ist nun aber gar nicht notwendig, daß alle kurzen Antennen gleichzeitig vorhanden sind. Es genügt vielmehr, ein und dieselbe kurze Antenne in zeitlicher Abfolge in die einzelnen Positionen zu bringen (wie dies bei einem Seitensicht-RADAR-System auf einem Flugkörper ohnehin geschieht), die Phase jeweils mitzuregistrieren und die Daten nachträglich in geeigneter Weise zu einem hochauflösenden Bild zu verarbeiten. Die Länge  $L$  der "synthetischen" Antenne ist dabei durch jene Flugstrecke gegeben, während der die reale kurze Antenne 1 einen bestimmten Geländepunkt "im Blickfeld" behält. Diese Strecke ist gemäß Bild 3.4-13 aber identisch mit der räumlichen Auflösung

$\Delta X_r$  der realen Antenne 1, sodaß wir für das Auflösungsvermögen des SAR in Flugrichtung schließlich erhalten:

$$\Delta X = \frac{(3.4-12)}{2 \cdot \Delta X_r} \cdot \frac{R \cdot \lambda}{2} = \frac{(3.4-8)}{2} \cdot \frac{R \cdot \lambda}{R \cdot \lambda} = \frac{1}{2} \quad (3.4-13)$$

Die Entfernungsunabhängigkeit von  $\Delta X$  kommt dadurch zustande, daß mit wachsender Entfernung  $R$  auch die Länge der synthetischen Antenne zunimmt!

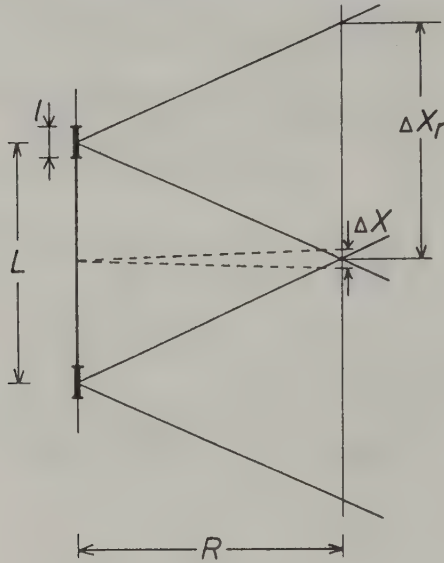


Bild 3.4-13: Zum räumlichen Auflösungsvermögen des SAR

Nach Gleichung (3.4-13) könnte das Auflösungsvermögen eines SAR durch Verkürzung der Antenne beliebig gesteigert werden. In der Praxis sind dem jedoch Grenzen gesetzt durch Antennen-Stabilitätsprobleme sowie durch die Forderung, daß die Flugbahn entlang der gesamten Länge der synthetischen Antenne bis auf Bruchteile der Wellenlänge genau bekannt sein muß.

Eine Voraussetzung für die Realisierbarkeit des Prinzips der synthetischen Apertur ist die Aufzeichnung der Phase der eintreffenden Strahlung und die Vergleichbarkeit der an den verschiedenen Antennenpositionen registrierten Phase. Diese Voraussetzung ist nur gegeben bei aktiven Systemen, bei denen man die Phase der auf das Objekt auftreffenden Strahlung kennt, sowie bei Verwendung von kohärenter Strahlung (d.h. von Strahlung, deren Phasenbeziehungen über längere Strecken und über längere Zeit konstant bleiben). Das



Prinzip der synthetischen Apertur kann daher bei passiven Mikrowellenradiometern sowie auch bei passiven optischen Fernerkundungssystemen keine Anwendung finden.

In der Fernerkundungs-Fachliteratur wird das SAR-Prinzip oft mit Hilfe des Doppler-Effekts erklärt. Es handelt sich dabei um eine zur vorliegenden Darstellung völlig analoge Erklärung, bei der die RADAR-Signale als Funktion der Zeit betrachtet werden, während wir hier das Hauptaugenmerk auf die räumliche Verteilung der Wellenfelder legen. Bei einer Betrachtung vom Gesichtspunkt des Doppler-Effekts darf nicht der (vielleicht naheliegende) Schluß gezogen werden, daß das SAR-Prinzip eine kontinuierlich bewegte Plattform voraussetzt !

SAR-Systeme werden wegen der Ausnützung der Kohärenzeigenschaften der Strahlung auch kohärente RADAR-Systeme genannt. Gewöhnliche Seitensicht-RADAR-Systeme ohne synthetischer Apertur heißen dementsprechend nichtkohärente RADAR-Systeme.

Die Verarbeitung von SAR-Daten zu einem hochauflösenden Bild ist kompliziert. Die Primärdaten können als Hologramm<sup>1</sup> der aufgenommenen Szene aufgefaßt und auch als solches optisch auf Film aufgezeichnet werden. Die Herstellung des hochauflösenden Bildes kann in diesem Fall durch "Rekonstruktion" aus dem Hologramm mit Hilfe von LASER-Licht, also mit kohärenzoptischen Methoden, erfolgen. Ein solcherart gewonnenes Bild nennt man "optisch verarbeitetes" SAR-Bild. Die Primärdaten können aber auch in digitaler Form (auf Magnetband) aufgezeichnet und rein digital zu einem Bild umgearbeitet werden. Diese digitale Verarbeitung ist aufwendig und benötigt auch auf modernsten Großrechenanlagen noch Rechenzeiten in der Größenordnung von mehreren Stunden pro Bild. Wegen der höheren Qualität "digital verarbeiteter" SAR-Bilder und der zunehmenden Leistungsfähigkeit digitaler Rechner geht der Trend jedoch eindeutig in Richtung digitaler Verarbeitung.

SAR-Bilder zeigen eine charakteristische Körnigkeit (Granulation), den sogenannten Speckle-Effekt, der bei allen mit kohärenter Strahlung aufgenommenen Bildern auftritt und z.B. auch im Bereich sichtbaren Lichts zu beobachten ist, wenn eine Szene mit LASER-Licht beleuchtet wird. Der Speckle-Effekt hat seine Ursache in Interferenzerscheinungen: Es gibt Bildpunkte, an denen sich die von einer rauen Oberfläche bzw. von einem inhomogenen Volumen zurückgestreuten Wellenzüge der bilderzeugenden Strahlung durch In-

---

<sup>1</sup> Ein Hologramm ist eine Aufzeichnung eines Wellenfeldes auf photographischem Film, wobei sowohl die Amplitude als auch die Phase des Wellenfeldes, also die gesamte Information über das Wellenfeld, in allen Punkten der Hologrammebene registriert sind. Durch Rekonstruktion kann das Wellenfeld aus dem Hologramm exakt wiederhergestellt werden.

terferenz zufällig auslöschen, und es gibt andere Bildpunkte, an denen sich diese Wellenzüge so überlagern, daß Interferenz-Maxima entstehen. Dieser Speckle-Effekt ist bei der Interpretation der RADAR-Bilder oft sehr störend. Es gibt eine Reihe von unterschiedlichen Methoden, das Speckle-Muster abzuschwächen oder zu unterdrücken, was jedoch prinzipiell nur auf Kosten der räumlichen Auflösung gelingt. Man hat also innerhalb gewisser Grenzen die Wahl zwischen SAR-Bildern mit höchster räumlicher Auflösung bei maximalem Speckle einerseits und SAR-Bildern mit reduzierter Auflösung, dafür aber auch reduziertem Speckle anderseits (Bild 3.4-14).

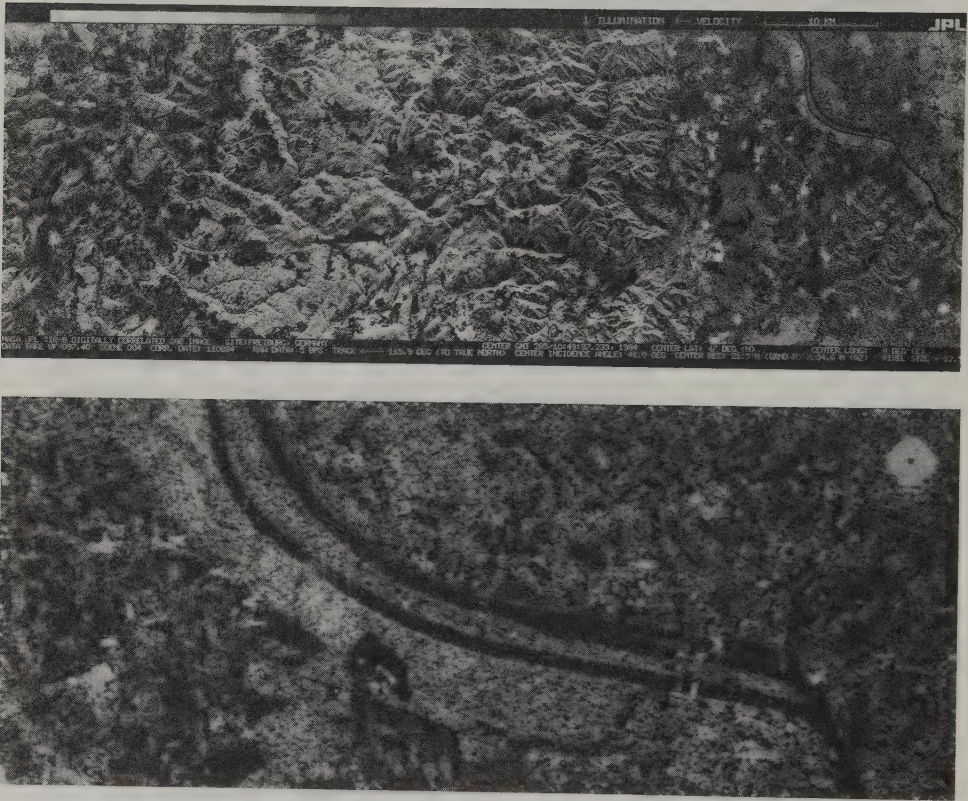


Bild 3.4-14: Digital verarbeitetes SAR-Bild, aufgenommen aus dem Space Shuttle mit SIR B (Shuttle Imaging RADAR B), Testgebiet Freiburg, BRD. Flughöhe 225 km, L-Band (23 cm, 1.28 GHz), Depressionswinkel  $49^{\circ}$ , räumliche Auflösung  $\Delta X = 34.6$  m,  $\Delta Y = 21.5$  m. Die Flugachse verläuft oberhalb des Bildes, parallel zur oberen Bildseite. In einem vergrößerten Bildausschnitt ist das Speckle-Muster (Granulation) zu erkennen.

### 3.4.3.3 Geometrische Eigenschaften von RADAR-Bildern

Wir besprechen die Entzerrung von Fernerkundungsbildern allgemein im Kapitel 6.4. Dort gehen wir auch auf die geometrischen Eigenschaften von Seitensicht-RADAR-Bildern näher ein. Hier soll nur kurz auf eine besondere geometrische Eigentümlichkeit von RADAR-Bildern hingewiesen werden, die auch Auswirkungen auf die im folgenden zu diskutierenden radiometrischen Eigenschaften hat: auf die sogenannten Verkürzungs- und Überlagerungseffekte.

In Bild 3.4-15 ist die Situation bei der Aufnahme von nicht ebenem Gelände skizziert. Auf der Geraden A ist die Position einiger Geländepunkte in Grundrißprojektion angegeben. Auf der Geraden B ist die Lage derselben Punkte auf einem nicht entzerrten RADAR-Bild angedeutet, d.h. es ist einfach die Laufzeit des Signals (die Schrägdistanz des betreffenden Geländepunkts vom Sensor) dargestellt. Auf der Geraden C ist schließlich die Punktlage auf einem für ebenes Gelände entzerrten RADAR-Bild gezeigt, d.h. es sind die auf B dargestellten Schrägdistanzen in Horizontaldistanzen umgewandelt unter der Annahme, daß alle Geländepunkte in einer Ebene (der Gelände-Bezugsebene) liegen, also unter Vernachlässigung der Geländeunebenheiten. Man erkennt, daß in der Bilddarstellung C alle in der Gelände-Bezugsebene liegenden Punkte lagerichtig (d.h. einer Grundrißprojektion entsprechend) wiedergegeben werden, während alle höher liegenden Geländepunkte zur Flugachse hin versetzt erscheinen. Die Lageversetzung nimmt bei gegebenem Höhenunterschied mit dem Abstand von der Flugachse (mit dem Abstand von der Sensor-Nadirlinie, mit abnehmendem Depressionswinkel  $\beta$ ) ab.



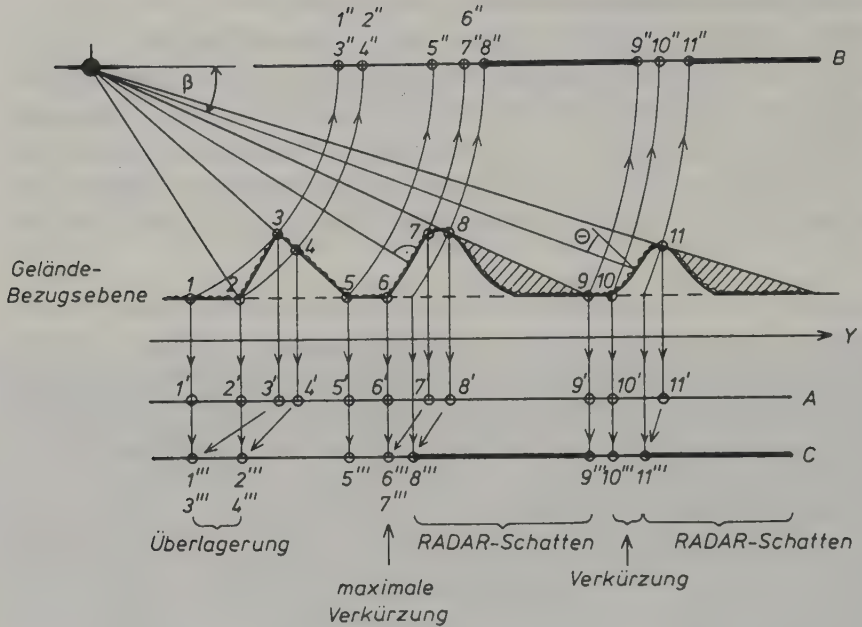


Bild 3.4-15: Zur Geometrie von RADAR-Bildern  
 A ... Grundrißprojektion,  
 B ... nicht entzerrtes RADAR-Bild,  
 C ... für ebenes Gelände (Gelände-Bezugsebene) entzerrtes RADAR-Bild

Ähnliche Verzerrungen als Folge von Geländeunebenheiten treten bei Luftbildern und optischen Abtaster-Bildern auf. Dort werden jedoch höherliegende Geländepunkte vom Bildmittelpunkt oder von der Streifenmitte (Flugachse) weg versetzt, und die Größe der Lageversetzung nimmt bei gegebenem Höhenunterschied mit dem Abstand vom Sensor-Nadirpunkt (von der Sensor-Nadirlinie) zu!

Als Folge der Lageversetzungen werden zum Sensor hin orientierte Hänge auf RADAR-Bildern verkürzt wiedergegeben (foreshortening, Bereich 10-11 in Bild 3.4-15). Bei einer gewissen Hangneigung (wenn der "lokale Einfallswinkel"  $\theta = 0$  ist) werden sogar alle Geländepunkte in einem einzigen Bildpunkt (in einer einzigen Linie auf dem zweidimensionalen Bild) abgebildet (Hangbereich 6-7). Bei noch steileren Hängen bzw. bei geringerer Entfernung von der Nadirlinie (größerem Depressionswinkel  $\beta$ ) kommt es zum Phänomen der Überlagerung (layover, Hang 2-3). Hier werden auf dem RADAR-Bild drei Geländeausschnitte (1-2, 2-3, 3-4) im selben Bildausschnitt überlagert abge-

bildet! Vom Sensor abgewandte Hänge liegen ab einer gewissen Steilheit bzw. ab einer gewissen Entfernung von der Nadirlinie im "RADAR-Schatten", d.h. sie werden von den RADAR-Impulsen gar nicht erreicht.

Bei gebirgigem Gelände sollten in Abhängigkeit von den durchschnittlichen Hangneigungen die Parameter des RADAR-Systems, insbesondere die Depressionswinkel, so gewählt werden, daß möglichst keine Überlagerungen auftreten. Bild 3.4-14 zeigt im linken (gebirgigen) Teil Verkürzungseffekte. Man hat den Eindruck, daß die Berge nach oben, d.h. zum Flugpfad hin, umgeklappt sind.

#### 3.4.3.4 Radiometrische Eigenschaften von RADAR-Bildern

Wir wollen uns hier überlegen, was die Stärke des RADAR-Echos, d.h. der Intensitätswert (Grauwert) eines Bildpunktes eines RADAR-Bildes, über die Eigenschaften des aufgenommenen Geländeelementes aussagt.

Es werde ein RADAR-Impuls der Energie  $Q_t$  ausgesendet. Hätte die Antenne eine vollkommen isotrope Abstrahlcharakteristik, so wäre die Energiedichte (Einheit: Energie/Fläche) in einer Entfernung  $R$  von der Antenne gleich  $Q_t/(4R^2\pi)$ . In Wirklichkeit bündelt die Antenne den Mikrowellenimpuls, sodaß die Energiedichte innerhalb des RADAR-Strahls  $G$ -mal größer, also gleich  $G \cdot Q_t/(4R^2\pi)$  ist.  $G$  heißt "Antennengewinn" und gibt das Verhältnis der in Antennenabstrahlrichtung ausgesendeten Energie zu der von einer fiktiven isotropen Antenne in denselben Raumwinkel ausgesendeten Energie an.  $G$  ist eine dimensionslose Größe und wird meist mit einem logarithmischen Maß in Dezibel (dB) angegeben (siehe Gleichung (3.4-6)). Fällt der RADAR-Strahl auf ein streuendes Objekt des Flächenquerschnitts  $\sigma$ , so trifft insgesamt folgende Energie auf dieses Objekt:

$$Q_s = \frac{G \cdot Q_t \cdot \sigma}{4R^2\pi} \quad (3.4-14)$$

Unter der Annahme, daß das Objekt den Reflexionsgrad  $\rho = 1$  und eine isotrope Streucharakteristik hat, wird es seinerseits zur Quelle eines Mikrowellenimpulses der Energie  $Q_s$ , der an der Position des RADAR-Geräts die Energiedichte  $Q_s/(4R^2\pi)$  besitzt. Die Antenne empfängt die Energie:

$$Q_r = \frac{Q_s \cdot F_A}{4R^2\pi} \quad (3.4-15)$$

$F_A$  ist die Fläche der Antenne.



Zwischen dem Gewinn  $G$  und der Fläche  $F_A$  einer Antenne besteht folgende Beziehung: Da eine Antenne der Länge  $l_1$  und der Breite  $l_2$  mit  $F_A = l_1 \cdot l_2$  gemäß Gleichung (3.4-1) einen Strahlbreite-Raumwinkel von

$$\Delta\Omega = \Delta\alpha_1 \cdot \Delta\alpha_2 = \frac{\lambda}{l_1} \cdot \frac{\lambda}{l_2} = \frac{\lambda^2}{F_A} \quad (3.4-16)$$

besitzt, wird die gesamte bei einer isotropen Antenne in den Raumwinkel  $4\pi$  gehende Energie in  $\Delta\Omega$  gestrahlt. Es gilt also:

$$G = \frac{4\pi}{\Delta\Omega} = \frac{4\pi F_A}{\lambda^2} \quad (3.4-17)$$

Bei genauerer Betrachtungsweise mußte in Gleichung (3.4-17) auch ein Faktor für Verluste vorgesehen werden. Die Gleichung (3.4-17) kann in der angegebenen Form jedoch beibehalten werden, wenn  $F_A$  als "effektive Antennenfläche" verstanden wird.

Wir erhalten damit aus (3.4-14), (3.4-15) und (3.4-17) die sogenannte RADAR-Gleichung:

$$Q_r = \frac{Q_s \cdot F_A}{4\pi R^2} = Q_t \cdot \frac{G \cdot \sigma \cdot F_A}{(4\pi R^2)^2} = Q_t \cdot \frac{G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \cdot \sigma \quad (3.4-18)$$

Sie gibt die Energie des RADAR-Echos  $Q_r$  als Funktion der ausgesendeten Energie  $Q_t$ , des Antennengewinns  $G$ , des Streuquerschnitts  $\sigma$  des streuenden Objekts und der Entfernung  $R$  an.

$\sigma$  ist hier zunächst als geometrischer Querschnitt eines Objekts eingeführt worden, das die gesamte auftreffende Energie isotrop in alle Richtungen des Raumes streut. Für alle realen Objekte mit teilweiser Absorption und anisotroper Streucharakteristik kann (3.4-18) als Definition von  $\sigma$  aufgefaßt werden!  $\sigma$  ist dann der geometrische Querschnitt eines fiktiven Körpers ohne Absorption und mit isotroper Rückstreuung, der in Richtung zum Empfänger hin dieselbe Energie rückstreut wie das reale Objekt.  $\sigma$  hat die Dimension einer Fläche.

Hat man es nicht mit einzelnen Objekten, sondern mit einer rückstreuenden Fläche (z.B. der Geländeoberfläche) zu tun, so bezieht man  $\sigma$  auf die Einheit der horizontalen Fläche  $F$  und definiert einen "RADAR-Rückstreuquerschnitt pro Flächeneinheit":

$$\sigma^0 = \frac{\sigma}{F} \quad (3.4-19)$$

oder aber auf die Einheit der senkrecht zur Strahlrichtung stehenden Fläche und definiert einen "RADAR-Rückstreuoeffizienten"

$$\gamma = \frac{\sigma^0}{\sin\beta} \quad (3.4-20)$$

Diese beiden Größen sind dimensionslos und werden meist mit einem logarithmischen Maß in Dezibel [dB] angegeben (vergleiche (3.4-6)).

Setzen wir nun  $\sigma$  aus (3.4-19) in (3.4-18) ein und fragen wir nach der Energie des Impulsechos, das von einem ebenen Gelände-Bildelement zurückkommt, so wird mit  $F = \Delta X \cdot \Delta Y$  (siehe Gleichungen (3.4-8) und (3.4-11))

$$Q_r = Q_t \frac{G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \sigma^0 \frac{R \cdot \lambda}{l} \cdot \frac{c \cdot \Delta t}{2 \cos\beta} = Q_t \frac{G^2 \lambda^3 c \cdot \Delta t \cdot \sigma^0}{2 (4\pi)^3 R^3 l \cdot \cos\beta} \quad (3.4-21)$$

$Q_t$  ist hier die Energie des ausgesendeten Mikrowellenimpulses,  $G$  der Antennengewinn,  $\lambda$  die Wellenlänge,  $c$  die Lichtgeschwindigkeit,  $\Delta t$  die Impulslänge,  $\sigma^0$  der Rückstreuquerschnitt pro Flächeneinheit der Geländeoberfläche,  $R$  die Schrägdistanz,  $l$  die Antennenlänge und  $\beta$  der Depressionswinkel. Die Stärke des RADAR-Echos einer Geländeoberfläche hängt also von der dritten Potenz der Schrägentfernung ab! Im Gegensatz dazu hatten wir bei passiven Fernerkundungssensoren keine Entfernungsabhängigkeit des Signals (siehe z.B. Gleichung (3.2-29) im Falle des optischen Abtasters).

Beispiel: Ein im X-Band bei 10 GHz arbeitendes RADAR-Gerät hat eine Antennenlänge von 4 m, einen Antennengewinn von 34.5 dB, eine Impulslänge von 100 ns und eine Impulsleistung von 100 kW. Das System nimmt aus einer Flughöhe von 3 km über Grund einen Geländestreifen mit einem Horizontalabstand zwischen 2 km und 5 km von der Flugnadirlinie auf.  $\sigma^0$  variiert zwischen -10 dB für den größten und -15 dB für den kleinsten vorkommenden Depressionswinkel. Man berechne die Energie des RADAR-Echos von einem Gelände-Bildelement bei der kleinsten und bei der größten Schrägdistanz.

#### Lösung:

kleinste Schrägdistanz:  $\tan\beta_1 = 3/2$ ;  $\beta_1 = 56.31^\circ$

$$R_1 = \sqrt{3000^2 + 2000^2} = 3605.6 \text{ m}; \quad \sigma_1^0 = -10 \text{ dB} \hat{=} 0.1$$

größte Schrägdistanz:  $\tan\beta_2 = 3/5$ ;  $\beta_2 = 30.96^\circ$

$$R_2 = \sqrt{3000^2 + 5000^2} = 5831.0 \text{ m}; \quad \sigma_2^0 = -15 \text{ dB} \hat{=} 0.0316$$

$$\lambda = \frac{c}{v} = \frac{3 \cdot 10^8}{10^{10}} = 0.03 \text{ m}; \quad G = 34.5 \text{ dB} \hat{=} 2818.4$$

$$Q_t = 100 \text{ kW} \cdot 10^{-7} \text{ s} = 0.01 \text{ W} \cdot \text{s} \quad Q_r = Q_t \frac{G^2 \lambda^3 c \cdot \Delta t \cdot \sigma^0}{2(4\pi)^3 1 \cdot R^3 \cos \beta} =$$

$$= 0.00405 \text{ W} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^3 \cdot \frac{\sigma^0}{R^3 \cos \beta}$$

$$Q_{r1} = 1.559 \cdot 10^{-14} \text{ W} \cdot \text{s} \quad Q_{r2} = 7.533 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{s}.$$

Die  $R^3$ -Abhängigkeit der RADAR-Signale kann nachträglich kompensiert werden, sodaß ein Bild entsteht, dessen Bildelementwerte proportional zu  $\sigma^0$  oder proportional zu  $\gamma = \sigma^0 / \cos \beta$  sind. Günstiger ist es, eine Antenne mit depressionswinkelabhängigem Antennengewinn einzusetzen, sodaß die  $R^3$ -Abhängigkeit schon bei der Aufnahme ausgeglichen wird.

Es ist instruktiv, die Ableitung von Gleichung (3.4-21) mit dem in Kapitel 2 erarbeiteten begrifflichen Werkzeug zu wiederholen und dabei die Rückstreuungseigenschaften des Geländes durch die Reflexionsfunktion  $f(\theta_e, \phi_e; \theta_r, \phi_r; \theta_e, \phi_e)$  zu beschreiben. Man erhält durch Vergleich des dabei erhaltenen Resultats mit (3.4-21):

$$\frac{\sigma^0}{\cos \theta} = 4\pi \cdot f(\theta_e, \phi_e; \theta_r = \theta_e, \phi_r = \phi_e) \text{ oder } \gamma = 4\pi \cdot f_e(\theta_e, \phi_r; \theta_r = \theta_e, \phi_r = \phi_e) \quad (3.4-22)$$

RADAR-Impulse können mit verschiedener Polarisationsrichtung ausgesendet bzw. empfangen werden, wobei eine "vertikale" (V) und eine "horizontale" (H) Polarisation (siehe Bild 3.4-7) definiert sind. Es ergeben sich insgesamt vier Kombinationsmöglichkeiten dieser beiden Polarisierungen bei Aussendung und Empfang eines RADAR-Systems:

Gleichpolarisation (like-polarisation):

HH (horizontale Aussendung, horizontaler Empfang)

VV (vertikale Aussendung, vertikaler Empfang)

Kreuzpolarisation (cross-polarisation):

HV (horizontale Aussendung, vertikaler Empfang)

VH (vertikale Aussendung, horizontaler Empfang).

$\sigma^0$  bzw.  $\gamma$  sind im allgemeinen für jede dieser Polarisations-Kombinationen unterschiedlich. Man unterscheidet also  $\sigma_{HH}^0$ ,  $\sigma_{VV}^0$ ,  $\sigma_{HV}^0$  und  $\sigma_{VH}^0$ .

Für nicht ebenes Gelände kann die Gleichung (3.4-21) modifiziert werden, was wir hier nur für den Spezialfall einer Geländeneigung mit einem Gradienten in Y-Richtung (Neigung um den Winkel  $\alpha$  um die X-Achse) andeuten wollen (Bild 3.4-16): Definiert man  $\sigma^0$  gemäß (3.4-19) mit F als schräge

Fläche, so wird:

$$F = \Delta X \cdot \Delta Y_s = \frac{R \cdot \lambda}{1} \cdot \frac{c \cdot \Delta t}{2 \sin \theta} = \frac{R \cdot \lambda}{1} \cdot \frac{c \cdot \Delta t}{2 \cos(\alpha + \beta)}$$

Man erhält anstelle von (3.4-21):

$$Q_r = Q_t \frac{G^2 \lambda^3 c \cdot \Delta t \cdot \sigma^0}{2(4\pi)^3 R^3 1 \cdot \sin \theta} = Q_t \frac{G^2 \lambda^3 c \cdot \Delta t \cdot \sigma^0}{2(4\pi)^3 R^3 1 \cdot \cos(\alpha + \beta)} \quad (3.4-23)$$

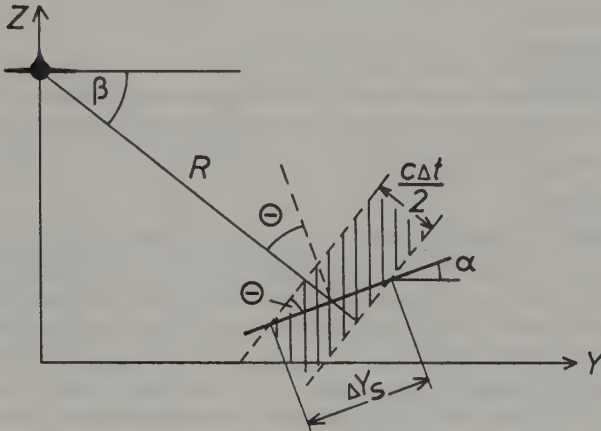


Bild 3.4-16: Zur Ableitung des RADAR-Echos bei geneigtem Gelände

Das RADAR-Echo nimmt also mit Abnahme von  $\theta$  zu und wächst für  $\theta = 0$  formal über alle Grenzen, da gemäß Bild 3.4-16  $\Delta Y_s$  gegen Unendlich geht. Die entsprechenden Geländeteile (die in Bild 3.4-15 als Bereiche maximaler Verkürzung eingetragen sind) erscheinen auf einem RADAR-Bild stark überstrahlt. Demgegenüber ist für Hänge, die vom Sensor abgewandt sind ( $\alpha < 0$  im Bild 3.4-16), das RADAR-Echo kleiner als für ebene Geländeteile desselben  $\sigma^0$  und wird gleich Null für  $\theta = 90^\circ$  bzw.  $\alpha + \beta = 0^\circ$  (Eintritt in den RADAR-Schatten). Es ist jedoch zu beachten, daß  $\sigma^0$  ebenfalls vom Einfallswinkel  $\theta$  abhängt, sodaß das RADAR-Echo nicht eine exakte  $1/\sin \theta$ -Abhängigkeit aufweist!

Wir wollen nun im folgenden den Einfluß von Gelände-Unebenheiten wieder vernachlässigen. So wie ein optisches Fernerkundungsbild die räumliche Verteilung des gerichteten Reflexionsgrades der Geländeoberfläche darstellt (siehe Abschnitt 3.1.1.3), repräsentiert ein RADAR-Bild die räumliche Verteilung von  $\sigma^0$  (oder  $\gamma$ ). Was sagt aber  $\sigma^0$  über die Geländeoberfläche aus, d.h. welche Information über die Geländeoberfläche ist in den Bildelementwerten eines RADAR-Bildes enthalten?

Es sind vor allem die Geländeeigenschaften

Oberflächenrauigkeit,

komplexe Dielektrizitätskonstante sowie

Struktur und Verteilung von Inhomogenitäten unter der Geländeoberfläche,

die in Kombination mit den Sensorparametern

Frequenz,

Polarisation und

Depressionswinkel,

die RADAR-Rückstreuung beeinflussen. Die Theorie der RADAR-Rückstreuung ist äußerst kompliziert und für viele natürliche Oberflächenarten noch nicht im einzelnen erforscht. Hier können nur die wesentlichsten Erkenntnisse zusammengefaßt werden:

- a) Mit zunehmender Oberflächenrauigkeit nimmt die RADAR-Rückstreuung im allgemeinen zu. Diese Tatsache ist verständlich, wenn man sich die Geometrie der RADAR-Aufnahme vor Augen hält (Bild 3.4-17): An einer glatten Oberfläche findet gerichtete Reflexion statt. Der vom RADAR-System ausgesendete Mikrowellen-Impuls wird daher vom Sensor weg reflektiert und das RADAR-Echo verschwindend klein. Mit zunehmender Rauigkeit wird die Reflexion mehr und mehr diffus, sodaß ein zunehmender Anteil der Strahlung zum Sensor zurückgestreut wird. Ist der Einfallswinkel aber klein, so liegt die Rückstreuungsrichtung nahe an der Richtung gerichteter Reflexion, sodaß das RADAR-Echo mit zunehmend diffuser Reflexion abnehmen kann.

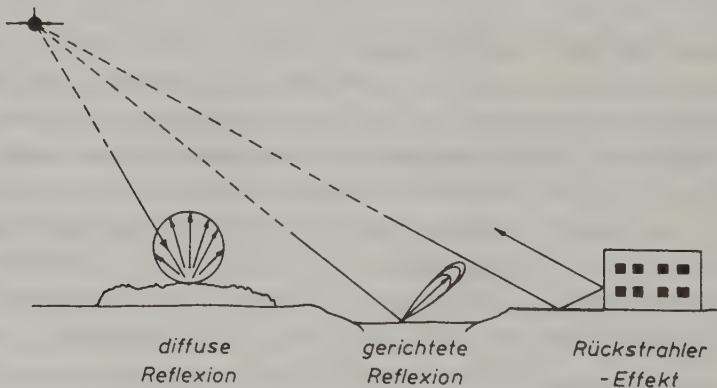


Bild 3.4-17: Reflexion von RADAR-Impulsen an verschiedenen Oberflächen (nach Lillesand/Kiefer, 1979)

Die Rauigkeit ist dabei im Sinn des Rayleigh-Kriteriums (Gleichung (2.5-5)) zu verstehen, d.h. eine Oberfläche mit Unebenheiten einer be-



stimmten Größenordnung wirkt umso rauer, je kleiner die Wellenlänge, je größer also die Frequenz der Strahlung ist.

Bei Oberflächen mit Zeilenstruktur (z.B. Ackerfurchen, Pflanzenreihen, Wasserwellen, Straßenreihen im städtischen Gebiet) ist die Zeilenrichtung für das Rückstreuvermögen wesentlich:  $\sigma^0$  ist groß, wenn die Zeilenrichtung (fast) senkrecht zur Einstrahlungsrichtung liegt, aber sehr klein für alle anderen Orientierungen.

Wenn glatte waagrechte und glatte senkrechte Oberflächen (z.B. Hauswände) mit ihrer Schnittgeraden senkrecht zur Einstrahlungsrichtung vorkommen, tritt der sogenannte Rückstrahler-Effekt (corner reflector, Bild 3.4-17) auf: Durch zweimalige gerichtete Reflexion an der horizontalen und an der vertikalen Fläche wird der RADAR-Impuls genau in Richtung zum Sensor zurückgeworfen. Es kommt zu Überstrahlungen im RADAR-Bild.

- b) Die für das Reflexionsvermögen einer Oberfläche wesentliche Materialeigenschaft ist die komplexe relative Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_r = \epsilon'_r - i\epsilon''_r$ , deren Bedeutung schon in Punkt 3.4.2 besprochen wurde. Der Reflexionsgrad nimmt mit zunehmendem  $\epsilon_r$  (sowohl  $\epsilon'_r$  als auch  $\epsilon''_r$ ) zu, ist also für Metalle sowie für Stoffe mit hohem Wassergehalt groß. Ein großer Reflexionsgrad muß aber nicht notwendigerweise eine hohe RADAR-Rückstreuung bedingen: Eine glatte Wasseroberfläche stellt z.B. einen fast idealen Mikrowellen-"Spiegel" dar; trotzdem ist das RADAR-Echo verschwindend klein, da der einfallende Mikrowellenimpuls bei  $\theta \neq 0$  vom Sensor weg reflektiert wird! Bei rauen Oberflächen ist jedoch das RADAR-Rückstreuvermögen umso größer, je größer  $|\epsilon_r|$  (je höher der Wassergehalt) ist.

Metallische Strukturen wie z.B. eiserne Brücken oder Hochspannungsmaste verursachen besonders starke RADAR-Echos.

- c) Die Eindringtiefe von Mikrowellen in Materie wurde ebenfalls schon in Punkt 3.4.2 besprochen (siehe auch Bild 3.4-9). Bei der Anwendung der dort gegebenen Daten auf die RADAR-Fernerkundung ist zu beachten, daß der Strahlungspfad bei RADAR im allgemeinen schräg verläuft ( $\theta \neq 0$ ), so daß die senkrecht zur Materieoberfläche gemessene Eindringtiefe entsprechend kleiner ist, und daß die Strahlung hin und zurück laufen muß, wodurch sich die Eindringtiefe halbiert. Die unter der Geländeoberfläche liegende Schicht von der Dicke der Eindringtiefe trägt durch Volumstreuung zum RADAR-Echo bei. Es kommt dabei zur teilweisen Entpolarisierung der Strahlung. Ein starkes RADAR-Echo bei Kreuzpolarisation weist daher besonders auf Volumstreuung hin. Diese Tatsache ist vor allem für RADAR-Aufnahmen von Vegetation bedeutungsvoll, da hier die Eindringtiefe relativ groß ist und die Volumstreuung daher dominiert.

Auch die Vorzugsorientierung der streuenden Inhomogenitäten hat einen großen Einfluß auf das polarisationsabhängige Rückstreuvermögen. Mit RADAR kann man daher z.B. Information über die "dielektrische Architektur" (Sieber, 1985) der Pflanzendecke erfassen. Das Rückstreuvermögen von Vegetation hängt aber auf jeden Fall wesentlich vom Wassergehalt ab. Eine Unterscheidung verschiedener Vegetationsarten auf Grund eines einzelnen RADAR-Bildes ist kaum möglich. Erst die Kombination mehrerer RADAR-Bilder unterschiedlicher Frequenz, unterschiedlicher Polarisation, unterschiedlicher Depressionswinkels und unterschiedlicher Aufnahme-Jahreszeit verspricht detaillierte Information über Art und Eigenschaften der Vegetationsdecke. Die entsprechenden Untersuchungen sind erst in ihrer Anfangsphase.

#### 3.4.3.5 Anwendungen von RADAR-Bilddaten

Wichtige praktische Anwendungen von RADAR-Bilddaten betreffen die folgenden Bereiche: (Soweit sich dabei Überschneidungen mit den Anwendungsmöglichkeiten passiver Mikrowellensysteme ergeben, ist der Unterschied im räumlichen Auflösungsvermögen zu beachten. Die Gelände-Bildelementgröße liegt bei Flugzeug-RADAR-Bildern üblicherweise im Meterbereich und ist damit mindestens um einen Faktor 10 kleiner als bei abbildenden Mikrowellenradiometern. Bei Satelliten-RADAR-Bildern ist die Bildelementgröße im Zehnermeterbereich und damit etwa um einen Faktor 1000 kleiner als bei abbildenden Mikrowellenradiometern.)

##### Kartographie:

- Herstellung von Bildplänen und topographischen Karten in Gebieten mit häufiger Wolkenbedeckung, wo die Aufnahme von photographischen Luftbildern schwierig bis unmöglich ist (Die ersten vollständigen Übersichtskarten von Panama und von Brasilien wurden z.B. mit RADAR hergestellt.),
- Landnutzungskartierung und Überwachung von Änderungen in der Landnutzung.

Geologie: geomorphologische Kartierung.

##### Hydrologie:

- Kartierung der Bodenfeuchtigkeit,
- Kartierung von Wasserflächen,
- Kartierung überschwemmter Gebiete bei Katastrophen,
- Kartierung der Schneebedeckung.

##### Landwirtschaft:

- Landnutzungskartierung,
- Kartierung der Bodenfeuchtigkeit.

##### Forstwirtschaft:

- Kartierung von Kahlschlägen,
- Kartierung von Waldbrand-Schadensflächen,
- in Zukunft vielleicht auch Erfassung von Waldschädigungen.

##### Ozeanographie:

- Feststellung der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung,
- Studium von Wellenmustern,

- Überwachung von Ölverschmutzungen (auf Grund der Beeinflussung der Wellenmuster, d.h. der Oberflächenrauigkeit),
- Kartierung des Meereises,
- Überwachung von Eisbergen.

Gletscherforschung:

- Feststellung von Ausdehnung, Eigenschaften und Veränderungen der Eis- und Schneebedeckung der Erde als Grundlage für das Verständnis der Geophysik von Eis und Schnee.

Besonders erfolgversprechend ist für viele Anwendungen der kombinierte Einsatz von Sensoren im optischen Spektralbereich und im Mikrowellenbereich. Im Abschnitt 4.2.4 ist ein SAR-Bild wiedergegeben.

Weiterführende Literatur zu RADAR: Henderson (1985), Manual of Remote Sensing (1983), Ulaby et al. (1981 - 1986), de Loor, (1983).

### 3.5 Terrestrische Erhebung von radiometrischen Referenzdaten zu optischen Fernerkundungsaufnahmen

Für die Auswertung von Fernerkundungsaufnahmen werden grundsätzlich immer auch am Boden erhobene Referenzdaten benötigt. So werden z.B. in der Photogrammetrie terrestrisch eingemessene Punkte (Paßpunkte) gebraucht, um die Elemente der äußeren Orientierung der Luftbilder zu ermitteln und damit eine photogrammetrische Auswertung zu ermöglichen. Für die thematische (semantische) Auswertung von Fernerkundungsaufnahmen werden Probepunkte (Pro-beflächen) aller aus den Aufnahmen zu kartierenden Flächenkategorien benötigt, um die charakteristischen spektralen Merkmale der einzelnen Kategorien ableiten und verifizieren zu können.

In diesem Kapitel befassen wir uns mit der Erhebung radiometrischer Referenzdaten im Gelände. Diese dienen vor allem dazu, den Einfluß der Atmosphäre auf die von den Fernerkundungssensoren erfaßte Strahlung abschätzen und eliminieren sowie die Fernerkundungssignale dadurch normieren zu können.

#### 3.5.1 Spektralradiometer

Ein Radiometer ist ein Instrument zur Strahlungsmessung. Erfast das Radiometer auch die spektrale Verteilung der Strahlung, so spricht man von einem Spektralradiometer. Erfast es die räumliche Verteilung (Richtungsverteilung) der Strahlung, so spricht man von einem abbildenden Radiometer. Die im Kapitel 3.2 besprochenen Abtaster (scanner) sind in diesem Sinne abbildende Spektralradiometer.

Für terrestrische Referenzmessungen ist eine geometrische Auflösung oft überflüssig, da man nur an punktuellen Messungen interessiert ist. Es kommen deshalb nichtabbildende Spektralradiometer zum Einsatz.

Ein nichtabbildendes Spektralradiometer enthält als wesentliche Bestandteile:

- einen oder mehrere Detektoren, d.h. strahlungsempfindliche Elemente, die den auftreffenden Strahlungsfluß in ein elektrisches Signal (Strom, Spannung) umwandeln,
- ein optisches System zur Spektralauswahl bzw. -zerlegung (Filter, Prisma, Beugungsgitter) sowie
- einen Tubus oder ein optisches System zur Eingrenzung des Raumwinkels der Messung.

Die Detektoren müssen mit ihrer spektralen Empfindlichkeit den gesamten Spektralbereich abdecken, zu dessen Unterstützung die radiometrischen Referenzmessungen durchgeführt werden. Für Referenzmessungen zu photographischen Farbinfrarotaufnahmen genügt also eine Detektorempfindlichkeit im Bereich von  $0.5\ \mu\text{m}$  bis  $0.9\ \mu\text{m}$ . Referenzmessungen zu Abtasteraufnahmen erfordern Instrumente mit entsprechend weiter reichender spektraler Empfindlichkeit. Gegebenfalls sind auch Geräte mit Thermal-Infrarot-Detektoren im  $10\ \mu\text{m}$ -Bereich einzusetzen. Auf die spezielle Problematik von Referenzmessungen im thermischen Infrarot wird hier jedoch nicht weiter eingegangen.

Die Spektralauswahl erfolgt im einfachsten Fall mit schmalbandigen optischen Filtern, vorzugsweise mit Interferenzfiltern.<sup>1</sup> Zur Gewinnung von Meßwerten in mehreren Spektralbereichen können die Filter in zeitlicher Aufeinanderfolge vor den Detektor geschaltet werden (z.B. mit Hilfe eines Filterrades, Bild 3.5-1a), oder aber es sind mehrere Detektoren mit unterschiedlichen Filtern nebeneinander angeordnet (Multiband-Radiometer, Bild 3.5-1b). Ein Multiband-Radiometer hat den Vorteil der simultanen Messung aller Spektralbereiche, sodaß zeitliche Änderungen der Bestrahlung (z.B. durch Dunstschleier) die gemessene relative Spektralverteilung nicht verfälschen. Ein sequentiell messendes Filterrad-Radiometer kann demgegenüber nur bei Einstrahlungsverhältnissen eingesetzt werden, die über die gesamte Meßzeit eines Spektrums (typischerweise mehrere Sekunden bis etwa eine Minute) völlig konstant sind.

---

<sup>1</sup> Ein Interferenzfilter besteht aus dünnen, in Vakuum auf ein Glassubstrat aufgedampften, dielektrischen und manchmal auch metallischen Schichten. Die Schichtdicken sind so gewählt, daß sich die Wellenzüge der hindurchtretenden Strahlung für alle Wellenlängen außerhalb des Transmissionsbereiches gegenseitig durch Interferenz auslöschen. Interferenzfilter können mit weitgehend beliebigen spektralen Transmissionskurven hergestellt werden.



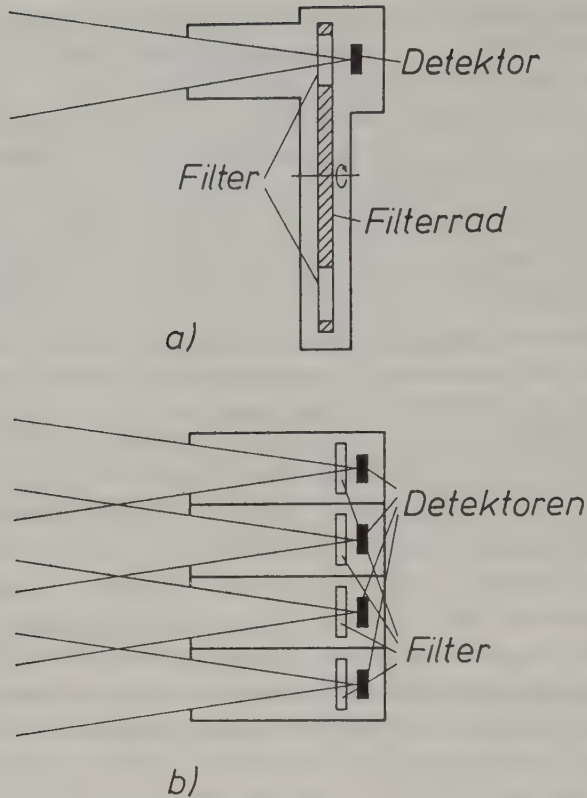


Bild 3.5-1: Spektralradiometer mit a) sequentieller und b) simultaner Erfassung der Spektralbereiche

Die Spektralauswahl bzw. Spektralzerlegung kann auch mit einem Beugungsgitter oder einem Prisma erfolgen. Das Gerät hat in diesem Fall eine Eingangsapertur. Der Strahlungspfad wird mit einem Beugungsgitter oder einem Prisma aufgespaltet. Die einzelnen Spektralbereiche werden dabei zu unterschiedlichen Detektoren (z.B. auf eine Detektorzeile) gelenkt (vergleiche Bild 3.2-2).

Der Raumwinkel der gemessenen Strahlung und die Größe der strahlenden Fläche ist durch die Abmessungen von Tubus und Detektor definiert (Bild 3.5-2): Ist die Tubuslänge  $l$  groß im Vergleich zum Durchmesser  $d_D$  des Detektors, so empfängt der Detektor genau jene Strahlung, die von einer Fläche der Größe  $F_F$  der strahlenden Oberfläche ausgeht. Der auf den Detektor

treffende Strahlungsfluß ist:

$$\dot{\Phi}_D = L \cdot \tau \cdot F_F \cdot \Omega_1 = L \cdot \tau \cdot F_F \cdot \frac{F_D}{a^2}$$

$\tau$  bezeichnet hier den Transmissionsgrad des dem Detektor vorgeschalteten Filters. Mit der Beziehung  $F_F/F_T = a^2/l^2$  erhält man:

$$\dot{\Phi}_D = \tau \frac{a^2 F_T}{l^2} \frac{F_D}{a^2} L = \frac{\tau \cdot F_T \cdot F_D}{l^2} L \quad (3.5-1)$$

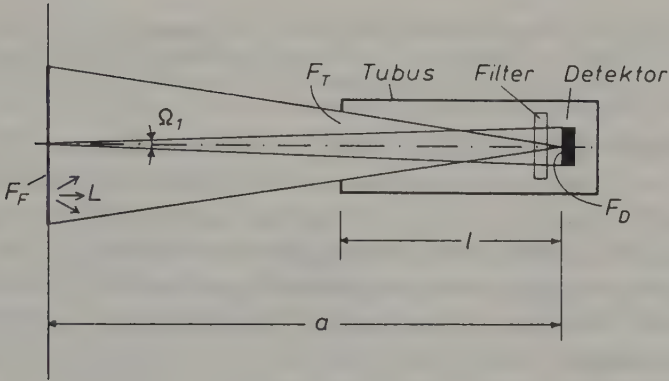


Bild 3.5-2: Einfaches Radiometer mit Tubus

Damit kann bei bekannter Empfindlichkeit  $R = U/\dot{\Phi}_D [V \cdot W^{-1}]$  des Detektors (siehe Gleichung (3.2-19)) und bei bekannten Instrumentenparametern  $\tau, F_T, F_D$  und  $l$  aus dem gemessenen Spannungssignal  $U$  die Strahldichte  $L$  der angepeilten Oberfläche ermittelt werden. Man beachte, daß der Abstand  $a$  ohne Einfluß auf das Meßergebnis ist.

**Beispiel:** Mit einem einfachen Tubus-Spektralradiometer gemäß Bild 3.5-2 werde die von einem Acker senkrecht nach oben reflektierte Strahlung gemessen. Der spektrale Empfindlichkeitsbereich ist durch ein Interferenzfilter auf das Intervall  $0.54 \mu m$  bis  $0.56 \mu m$  begrenzt, der mittlere Transmissionsgrad des Filters in diesem Bereich ist 50%. Die geometrischen Instrumentenparameter sind  $F_T = 21 \text{ cm}^2$ ,  $F_D = 0.25 \text{ cm}^2$ ,  $l = 20 \text{ cm}$ . Das Gerät ist in nW geeicht und zeigt  $\dot{\Phi}_D = 780 \text{ nW}$  an. Die kleinste meßbare Strahlungsleistung ist, bedingt durch Detektor- und Verstärkerrauschen,  $10 \text{ nW}$ . Die spektrale Bestrahlungsstärke der Geländeoberfläche ist  $E_{G\lambda} = 0.55 \mu W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$ .

a) Man ermittle die spektrale Strahldichte sowie den senkrecht nach oben gerichteten Reflexionsgrad des Ackers bei  $\lambda = 0.55 \mu m$ .

b) Kann das Instrument bei dieser Wellenlänge generell zur Messung der von Geländeoberflächen nach oben reflektierten Strahlung eingesetzt werden ?

Lösung: a) Die Gleichung (3.5-1) ist zunächst für spektrale Größen anzuschreiben (siehe (2.3-14) und (2.3-18)):

$$\begin{aligned} \dot{E} &= \dot{E}_\lambda \cdot \Delta\lambda = L_\lambda \frac{\tau \cdot F_T \cdot F_D}{l^2} \Delta\lambda \\ L_\lambda &= \frac{\dot{E} \cdot l^2}{\tau \cdot F_T \cdot F_D \cdot \Delta\lambda} = \frac{780 \cdot 10^{-9} (0.2)^2}{0.5 \cdot 21 \cdot 10^{-4} \cdot 0.25 \cdot 10^{-4} \cdot 0.02} = 59.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1} \\ \rho_{r\lambda} &= \frac{(2.5-8) \pi \cdot L_\lambda}{E_{G\lambda}} = 15.6\% \end{aligned}$$

b) Bei einem Reflexionsgrad von 15.6% ist das Signal um den Faktor  $S/N = 780/10 = 78$  über dem Rauschen. Die kleinste meßbare Reflexionsgradänderung ist daher  $15.6/78 = 0.2\%$ . Das Instrument erscheint daher für den angegebenen Zweck sehr gut verwendbar.

Der Öffnungswinkel  $\Delta\alpha$  des Tubus-Spektralradiometers gemäß Bild 3.5-2 ist  $\Delta\alpha = d_T/l$ . ( $d_T$  ist hier der Durchmesser der Tubusöffnung.) Möchte man den Öffnungswinkel verkleinern, um die Strahldichte kleinerer Oberflächenteile gezielt messen zu können, also um die geometrische Auflösung zu verbessern, so verkleinert man mit  $d_T$  auch  $F_T$  und damit nach Gleichung (3.5-1) die radiometrische Auflösung des Instrumentes. Dieses Problem tritt beim Linsen-Spektralradiometer (Bild 3.5-3) nicht auf. Hier bildet eine Optik den zu messenden Teil der Oberfläche auf den Detektor ab. Für dieses Instrument können wir Gleichung (3.2-28) verwenden, wenn wir zusätzlich den Transmissionsgrad  $\tau_F$  des Filters einfügen:

$$\dot{E}_D = \frac{d_L^2 \cdot F_D \cdot \tau_O \cdot \tau_F \cdot \pi \cdot L}{4f^2} \quad F_L = \frac{d_L^2 \pi}{4} \quad = \frac{\tau_O \cdot \tau_F \cdot F_L \cdot F_D}{f^2} L \quad (3.5-2)$$

Diese Gleichung ist formal ähnlich der Gleichung (3.5-1); die Fläche  $F_T$  der Tubusöffnung wurde durch die Fläche  $F_L$  der Objektivöffnung und die Tubuslänge  $l$  durch die Brennweite  $f$  ersetzt. Der Öffnungswinkel  $\alpha$  des Linsen-Spektralradiometers ist aber durch  $\Delta\alpha = d_D/f$  gegeben. ( $d_T$  ist der Durchmesser des Detektors). Durch Vergrößerung der Linsenfläche  $F_L$  kann daher die radiometrische Auflösung des Instrumentes verbessert werden, ohne das geometrische Auflösungsvermögen, also  $\Delta\alpha$ , zu beeinflussen. Vergrößert man

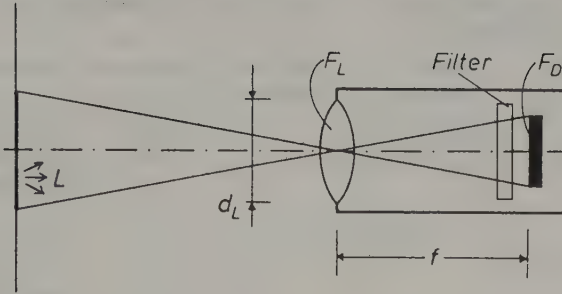


Bild 3.5-3: Linsen-Spektralradiometer

dagegen die Fläche  $F_T$  beim Tubus-Spektralradiometer, verbessert sich zwar ebenfalls die radiometrische Auflösung, aber man verschlechtert gleichzeitig die geometrische Auflösung.

Beispiel: a) Man modifiziere den Tubus des oben beschriebenen Radiometers so, daß der Öffnungswinkel 3 gon betrage, und berechne die kleinste meßbare Reflexionsgradänderung für dieses Gerät.

b) Man ersetze den Tubus durch ein Objektiv der Blende  $f/d_L = 4$  und ermittle - ebenfalls bei einem Öffnungswinkel von 3 gon - die kleinste meßbare Reflexionsgradänderung für diese Konfiguration ( $\tau_0 = 0.8$ )

Lösung: a) 3 gon =  $3 \cdot \pi / 200 \text{ rad} = 0.0471 \text{ rad} = d_T / l$

$$F_T = \frac{d_T^2 \pi}{4} = \frac{(0.0471 \cdot l)^2 \pi}{4}$$

$$\stackrel{(3.5-1)}{i_D} = 0.5(0.0471)^2 \frac{\pi}{4} 0.25 \cdot 10^{-4} \cdot 59.4 \cdot 0.02 = 25.87 \text{ nW}$$

$$S/N = 25.87/10 = 2.6 \text{ für eine Oberfläche mit } \rho_{r\lambda} = 15.6\%,$$

$$\text{Es gilt daher: } NE\Delta\rho = 15.6/2.6 = 6\%$$

$$\text{b) } \frac{f}{d_L} = 4; \quad \frac{F_L}{f^2} = \frac{d_L^2 \pi}{4 f^2} = \frac{\pi}{4(4)^2} = 0.04909$$

$$d_D = 0.5 \text{ cm, } f = 0.5/0.0471 = 10.6 \text{ cm}$$

$$\stackrel{(3.5-2)}{i_D} = 0.8 \cdot 0.5 \cdot 0.04909 \cdot 0.25 \cdot 10^{-4} \cdot 59.4 \cdot 0.02 = 583 \text{ nW}$$

$$S/N = 583/10 = 58.3; \quad NE\Delta\rho = 15.6/58.3 = 0.27\%$$

Bei gleicher geometrischer Auflösung verbessert sich durch die Benutzung einer Optik das radiometrische Auflösungsvermögen erheblich !  $NE\Delta\rho$  sinkt von 6% auf 0.27% !

In Tab. 3.5-4 sind Kenngrößen einiger kommerziell erhältlicher, für terrestrische Referenzmessungen zu Fernerkundungsaufnahmen geeigneter Spektralradiometer zusammengestellt.

Hersteller, Modell	Spektralbereich	Anzahl Kanäle	Meßwinkel	Prinzip, Bemerkungen
Barnes 12-1000	0.4-3.0µm 10.4-12.5µm	8	1°, 15°, >120°	Multiband, Spektralkanäle z.B. angepaßt an Landsat TM
Daedalus SpectraFax AA440	0.45-2.40µm	360	1.5°	sequentielle Messung, Interferenzfilterrad mit kontinuierlich variierendem Durchlässigkeitsbereich, Meßzeit 3s/Spektrum
Delphi Industries Ltd.	400-1100 nm	8	1°, 20°	Multiband, Meßzeit 2s
Moniteq PROBAR	400-2350 nm	130	1°, 15°	Spektralzerlegung mit Prisma, 130 Detektoren
Spectron Engineering SE590	400-1100 nm	256	10°	Spektralzerlegung mit Beugungsgitter

Tab. 3.5-4: Spektralradiometer für terrestrische Referenzmessungen

### 3.5.2 Meßanordnung

Für die Messung der direkten Sonnenstrahlung verwendet man ein Spektralradiometer mit einem Öffnungswinkel, der jenem Winkel entspricht, unter dem der Durchmesser der Sonne von der Erde aus gesehen wird. Das Gerät wird gegen die Sonne gerichtet, sodaß nur Strahlung von der Sonne (und Himmelsstrahlung aus einem schmalen, die Sonne umgebenden Ring, die jedoch im Vergleich zur Sonnenstrahlung vernachlässigt werden kann) gemessen wird (Bild 3.5-5).

Zahlenbeispiel: Man berechne den ebenen Winkel, den der Tubus eines Radiometers für die direkte Sonnenmessung zu begrenzen hat, wenn die Messung eines Spektrums bis zu einer Minute dauern kann. Der Durchmesser der Sonne ist  $d = 1.391 \cdot 10^6$  km, ihre Entfernung von der Erde  $149.6 \cdot 10^6$  km.

Lösung:  $\Delta\alpha_1 = 1.391/149.6 = 0.0093 \text{ rad} \hat{=} 0.59 \text{ gon}$   
Dazu kommt noch jener Winkel, um den sich die Erde innerhalb von 1 min dreht:  $\Delta\alpha_2 = 400/(24 \cdot 60) = 0.28 \text{ gon}$ .  $\Delta\alpha = \Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2 = 0.87 \text{ gon}$  (im ungünstigsten Fall am Äquator). In der Praxis wird für die direkte Sonnenmessung ein Öffnungswinkel von etwa 1 gon gewählt.



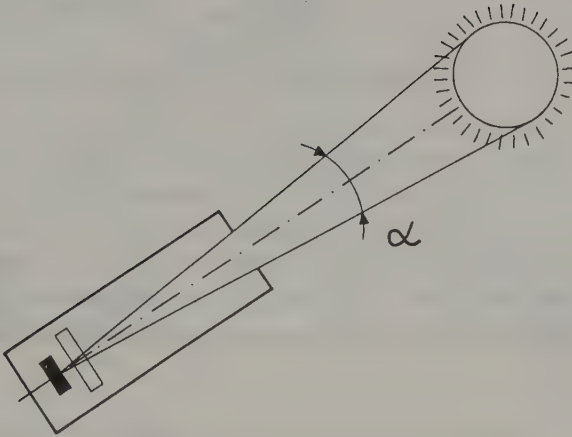


Bild 3.5-5: Messung der direkten Sonnenstrahlung

Für die Messung der von der Geländeoberfläche reflektierten Strahlung wird das Spektralradiometer auf ein galgenförmiges Gestänge oder auf eine Hubkanzel (Bild 3.5-6) montiert, in eine gewisse Höhe  $h$  über dem Boden gebracht und mit der Meßöffnung lotrecht nach unten gerichtet. Bei einem Öffnungswinkel  $\Delta\alpha$  wird die von einer Fläche des Durchmessers  $d = h \cdot \Delta\alpha$  reflektierte Strahlung gemessen. Bei inhomogener Geländeoberfläche muß entweder  $d$  so groß sein, daß alle Oberflächenanteile mit ihren natürlichen Flächenanteilen innerhalb der Meßfläche vorkommen, oder aber es sind mehrere Messungen an verschiedenen repräsentativ ausgewählten Stellen durchzuführen, die dann gemittelt werden. Der Öffnungswinkel  $\Delta\alpha$  für die reflektierte Strahlung sollte jedoch nicht über 20 gon betragen, da sonst das Meßergebnis bei starker Richtungsabhängigkeit der Strahlung verfälscht werden könnte.

Beispiel: Mit einem Spektralradiometer des Öffnungswinkels  $\Delta\alpha = 15$  gon soll die von einem frisch gepflügten Acker reflektierte Strahlung gemessen werden. Der Furchenabstand sei 0.7 m. Wie hoch ist das Spektralradiometer bei der Messung zu halten, damit die Meßfläche drei Furchen umfaßt?

Lösung:

$$h = \frac{d}{\Delta\alpha} = \frac{3 \cdot 0.7}{15 \cdot \pi / 200} = 8.9 \text{ m.}$$

Für diese Messung wäre eine Hubkanzel notwendig.

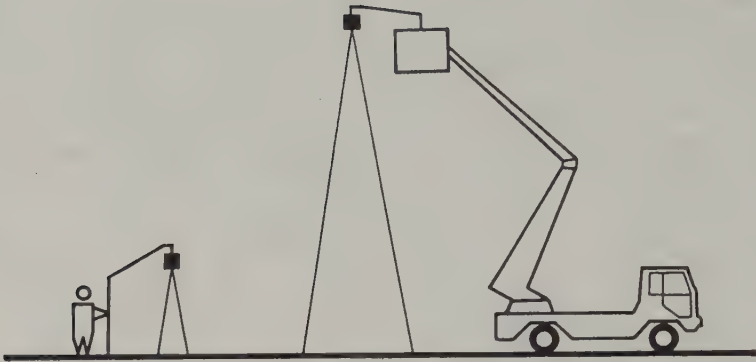


Bild 3.5-6: Messung der von der Geländeoberfläche reflektierten Strahlung

Für die Messung der auf eine horizontale Fläche fallenden Globalstrahlung kann man im Prinzip dieselbe Meßanordnung wie für die reflektierte Strahlung wählen, wenn man eine diffus reflektierende Platte bekannten Reflexionsgrades  $\rho_0$  (Reflexionsstandard) unter das Spektralradiometer legt. Nimmt man an, daß das Instrument eine direkte Ablesung der Strahldichte  $L$  erlaubt, so erhält man die Bestrahlungsstärke  $E_G$  der Platte durch Globalstrahlung aus:

$$E_G = \frac{\pi \cdot L}{\rho_0} \quad (3.5-3)$$

Als Reflexionsstandard eignet sich z.B. reinweißer Karton, dessen Reflexionsgrad im Sichtbaren und im nahen Infrarot ungefähr 90% beträgt.

Einfacher als die Verwendung eines Reflexionsstandards ist das Vorsetzen eines Diffusors vor die Meßöffnung des Spektralradiometers, sodaß Strahlung aus dem gesamten Halbraum erfaßt wird. Das Instrument ist dann für die Messung der Globalstrahlung mit der Meßöffnung senkrecht nach oben (horizontale Diffusor-Mattscheibe) aufzustellen und kann bei geeigneter Eichung direkt die Bestrahlungsstärke  $E_G$  anzeigen.

In dieser Meßanordnung kann man durch Abdecken der direkten Sonnenstrahlung auch die Bestrahlungsstärke  $E_H$  einer ebenen Fläche durch Himmelsstrahlung messen: Man hält dazu eine (auf einer Stange montierte) Platte in etwa 1.5 bis 2 m Entfernung vom Instrument so, daß der Schatten der Platte auf den Meßdiffusor fällt.

Reflexionsstandard bzw. Diffusor sind bei diesen Globalstrahlungsmessungen sorgfältig zu horizontalisieren.

### 3.5.3 Ermittlung der optischen Dicke der Atmosphäre

Bezeichnen wir mit  $E_{S,\lambda}$  die spektrale Bestrahlungsstärke einer auf die einfallende Sonnenstrahlung senkrechten Fläche auf Geländeniveau und mit  $E_{SO,\lambda}$  die spektrale Bestrahlungsstärke einer auf die einfallende Sonnenstrahlung senkrechten Fläche außerhalb der Atmosphäre (z.B. auf Satellitenniveau) sowie mit  $\tau_{\text{ext}}(\lambda, \theta)$  die spektrale optische Dicke der gesamten Atmosphärenschicht für den schrägen Strahlungspfad der Sonnenstrahlung (Zenitwinkel  $\theta$ ), so gilt gemäß (2.7-8):

$$E_{S,\lambda} = E_{SO,\lambda} \cdot e^{-\tau_{\text{ext}}(\lambda, \theta)} \quad (3.5-4)$$

Aus (2.7-9) und (2.7-14) folgt:

$$\tau_{\text{ext}}(\lambda, \theta) = \frac{\tau_{\text{ext}}(\lambda, 0)}{\cos \theta} \quad (3.5-5)$$

Somit lautet (3.5-4):

$$E_{S,\lambda} = E_{SO,\lambda} \cdot e^{-\frac{\tau_{\text{ext}}(\lambda, 0)}{\cos \theta}} \quad (3.5-6)$$

$\tau_{\text{ext}}(\lambda, 0)$  ist die spektrale optische Dicke der gesamten Atmosphärenschicht für einen lotrechten Strahlungspfad.  $\tau_{\text{ext}}(\lambda, 0)$  ist vom Sonnenstand unabhängig, wird vor allem vom aktuellen Aerosolgehalt der Atmosphäre beeinflusst und stellt eine brauchbare Kenngröße zur Charakterisierung der für Fernerkundungsaufnahmen relevanten Eigenschaften der Atmosphäre dar.

$E_{SO,\lambda}$  ist auf Grund von Messungen aus hochfliegenden Flugzeugen, Raketen und Satelliten bekannt und in der Literatur tabelliert (Bild 3.5-7).<sup>1</sup> Diese Angaben beziehen sich meist auf die durchschnittliche Entfernung Erde-Sonne von  $r_S = 149.6 \cdot 10^6 \text{ km}$ . Die jahreszeitlichen Schwankungen dieser Entfernung bewirken eine Änderung von  $E_{SO,\lambda}$  von etwa  $\pm 3\%$  (vergleiche Aufgabe 2.3-3), was bei genaueren Untersuchungen zu berücksichtigen ist. Mißt man  $E_{S,\lambda}$  an der Geländeoberfläche mit einem kalibrierten, in Bestrahlungsstärkeneinheit

<sup>1</sup> Die von dieser Kurve und der Abszissenachse eingeschlossene Fläche ist ungefähr  $1375 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . Sie repräsentiert die von der Sonne auf die Erde treffende Strahlung und wird als Solarkonstante bezeichnet.

ten geeichten Spektralradiometer, so läßt sich bei bekanntem Zenitwinkel  $\theta$  der Sonne aus (3.5-6) die Atmosphärenkenngröße  $\tau_{\text{ext}}(\lambda, 0)$  ermitteln.

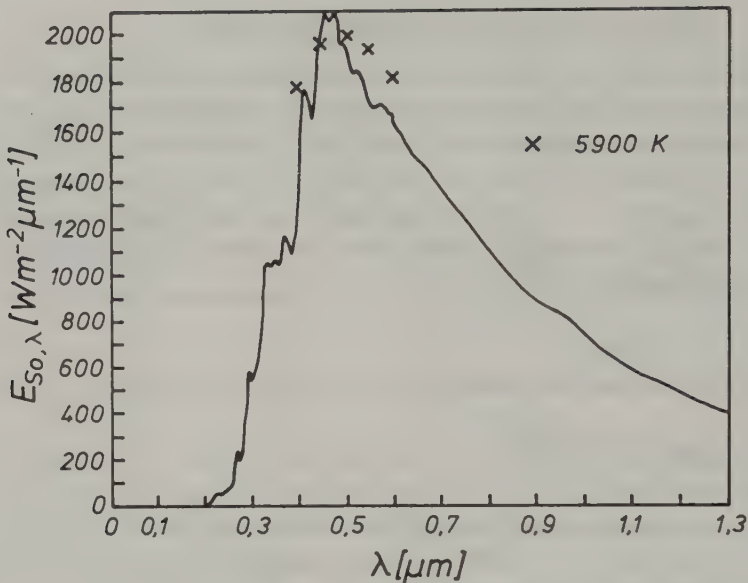


Bild 3.5-7: Spektrale Bestrahlungsstärke der Sonnenstrahlung über der Erdatmosphäre (nach Slater, 1980)

Beispiel: Es sollen Farb-Infrarot-Luftbilder aus einer Flughöhe von 4000 m über Grund aufgenommen werden. Aus Versuchsreihen ist bekannt, daß die spektrale optische Dicke der gesamten Atmosphärenschicht für einen lotrechten Strahlungspfad  $\tau_{\text{ext}}(\lambda=0.55\mu\text{m}, 0) < 0.4$  sein muß, um für diese Flughöhe hinreichend kontrastreiche Luftbilder zu erhalten. Kurz vor dem geplanten Bildflug wird die direkte Sonneneinstrahlung am Boden mit  $E_{S, \lambda=0.55\mu\text{m}} = 1053 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$  bei einem Zenitwinkel der Sonne von  $\theta = 41^\circ$  gemessen. Aus Tabellen ist  $E_{So, \lambda=0.55\mu\text{m}} = 1690 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$  gegeben. Soll der Bildflug durchgeführt werden? Wie groß ist der spektrale Transmissionsgrad der Atmosphäre  $\tau_A(\lambda=0.55\mu\text{m}, \theta=0)$ ?

Lösung:

$$(3.5-6): \tau_{\text{ext}}(\lambda, 0) = \ln \left( \frac{E_{So, \lambda}}{E_{S, \lambda}} \right) \cdot \cos \theta = \ln \frac{1690}{1053} \cos 41^\circ = 0.357$$

Die optische Dicke liegt unter dem geforderten Grenzwert. Der Bildflug wird daher hinreichend kontrastreiche Luftbilder liefern.

$$(2.7-9): \tau_A(\lambda, 0) = e^{-0.357} = 70\%$$

Voraussetzung für dieses Verfahren der Ermittlung von  $\tau_{\text{ext}}(\lambda, 0)$  ist ein möglichst genau geeichtetes Spektralradiometer. Mißt man jedoch  $E_{S, \lambda}$  bei verschiedenen Winkeln  $\theta$ , d.h. im Laufe eines Tages bei wechselndem Sonnen-

stand, so können aus (3.5-6) sowohl  $E_{S0,\lambda}$  als auch  $\tau_{ext}(\lambda,0)$  bestimmt werden. Man erhält dann  $E_{S0,\lambda}$  in jenen Einheiten, die das Gerät anzeigt, d.h. eine absolute Eichung des Spektralradiometers ist nicht notwendig. Man kann vielmehr umgekehrt durch Vergleich des ermittelten  $E_{S0,\lambda}$  mit den tabellierten Werten das Instrument eichen ! Voraussetzung dafür sind allerdings atmosphärische Verhältnisse, die mehrere Stunden lang konstant bleiben (Vormittag an klaren Tagen !).

Durch Logarithmieren von (3.5-6) erhält man:

$$\ln E_{S,\lambda} = \ln E_{S0,\lambda} - \tau_{ext}(\lambda,0) \cdot \frac{1}{\cos \theta} \quad (3.5-7)$$

Trägt man in einem Koordinatensystem auf der Abszisse die Werte  $1/\cos \theta$  der einzelnen Messungen und auf der Ordinate die zugehörigen Werte  $\ln E_{S,\lambda}$  auf, so müssen - wenn die obige Bedingung erfüllt ist - alle Meßpunkte auf einer Geraden liegen. Die Steigung der Geraden gibt  $\tau_{ext}(\lambda,0)$  an, der Ordinatenabschnitt bei  $1/\cos \theta = 0$  ist  $\ln E_{S0,\lambda}$ . Dieses Verfahren ist als "Langley-Plot-Methode" bekannt (Bild 3.5-8) (Slater (1980), Jackson and Slater (1986)).

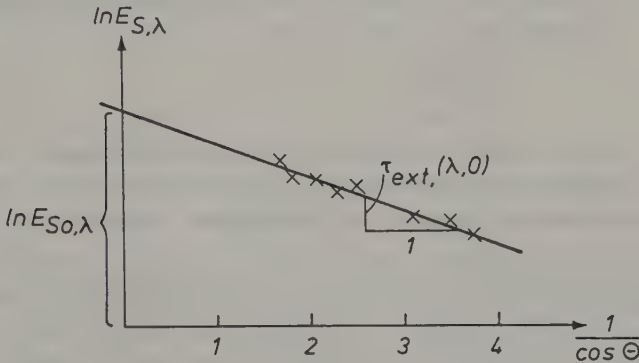


Bild 3.5-8: Bestimmung der optischen Dicke der Atmosphäre nach der Langley-Plot-Methode



### 3.5.4 Ermittlung des gerichteten Reflexionsgrades von Oberflächen

Mißt man mit einem Spektralradiometer die Strahldichte  $L_{r\lambda}$  der vom Gelände nach oben reflektierten Strahlung und in kurzem zeitlichen Abstand (bei gleichbleibenden Einstrahlungsverhältnissen) die Strahldichte  $L_{ro\lambda}$  der reflektierten Strahlung, die von einem Reflexionsstandard mit bekanntem spektralem Reflexionsgrad  $\rho_o(\lambda)$  ausgeht, so erhält man für den spektralen Reflexionsgrad  $\rho(\lambda)$  des Geländes:

$$\rho(\lambda) = \rho_o(\lambda) \frac{L_{r\lambda}}{L_{ro\lambda}} \quad (3.5-8)$$

Das Instrument braucht für diese Anwendung nicht kalibriert zu sein.

Hat man ein kalibriertes Spektralradiometer, das für Strahldichtemessungen und - bei Vorsetzen eines Diffusors - für Bestrahlungsstärkemessungen geeignet ist, so erhält man  $\rho(\lambda)$  aus (3.5-3):

$$\rho_\lambda = \frac{\pi \cdot L_{r\lambda}}{E_{G\lambda}} \quad (3.5-9)$$

Man kann - bei gegebener Eichung für Strahldichtemessungen - die Eichung für Bestrahlungsstärkemessungen auch selbst durchführen, wenn ein Reflexionsstandard bekannten spektralen Reflexionsgrades vorhanden ist.

Beispiel: Mit einem Spektralradiometer wird einerseits die von einem Kleefeld, andererseits die von einem Reflexionsstandard (Karton mit  $\rho_o(\lambda) = 0.9$  für alle Wellenlängen) nach oben reflektierte Strahlung gemessen:  
 $L_{r\lambda=0.55\mu m} = 26.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ ,  $L_{r\lambda=0.80\mu m} = 90.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ ,  
 $L_{ro\lambda=0.55\mu m} = 301 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ ,  $L_{ro\lambda=0.80\mu m} = 215 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ .  
 Bei Vorsatz eines Diffusors sind folgende Werte für die Globalstrahlung abzulesen:  $E_{G\lambda=0.55\mu m} = 14.3$  Einheiten,  $E_{G\lambda=0.80\mu m} = 10.1$  Einheiten.

a) Man ermittle den Reflexionsgrad des Kleefeldes.

b) Man ermittle den Eichfaktor  $\frac{\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}}{\text{Einheit}}$  des Spektralradiometers mit Diffusorvorsatz und die Globalstrahlung in absoluten Einheiten

Lösung: a) (3.5-8):  $\rho(\lambda=0.55\mu m) = 0.9 \frac{26.7}{301} = 0.0798 \hat{=} 8.0\%$   
 $\rho(\lambda=0.80\mu m) = 0.9 \frac{90.7}{215} = 0.3797 \hat{=} 38.0\%$

b) (3.5-9):  $E_{G\lambda} = \frac{\pi \cdot L_{ro\lambda}}{\rho_o(\lambda)}$   
 $E_{G\lambda=0.55\mu m} = \frac{\pi \cdot 301}{0.9} = 1050.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$   
 $E_{G\lambda=0.80\mu m} = \frac{\pi \cdot 215}{0.9} = 750.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$

Als Eichfaktor ergibt sich bei

$$\lambda=0.55\mu\text{m}: \frac{1050.7}{14.3} = 73.48 \frac{\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\mu\text{m}^{-1}}{\text{Einheit}}$$
$$\lambda=0.80\mu\text{m}: \frac{750.5}{10.1} = 74.31 \frac{\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\mu\text{m}^{-1}}{\text{Einheit.}}$$

Es gibt Spektralradiometer, die gleichzeitig mit zwei Meßaperturen die nach oben gerichtete Strahldichte und die aus dem oberen Halbraum kommende Bestrahlungsstärke messen. Bei diesen Geräten ist eine direkte Ablesung des Reflexionsgrades der angepeilten Oberfläche möglich.

Weiterführende Literatur zu terrestrischen radiometrischen Referenzmessungen: Slater, (1980), Robinson et al., (1982).

#### 4. DAS ANGEBOT UND DIE BESCHAFFUNG VON AUFNAHMEN

Bei der Bestellung von Flugzeugaufnahmen kann der Besteller in der Regel den Informationsträger, den Typ des Aufnahmegerätes und die Flugdisposition vorschreiben. Der Bildinterpret, der häufig der Besteller ist, muß daher mit diesen Fragen, die man mit dem Begriff Flugplanung zusammenfaßt, vertraut sein. Bei Satellitenaufnahmen hat der Besteller dagegen keinen Einfluß auf die Flugplanung. Der Bildinterpret muß aber über das reichhaltige Angebot von Satellitenaufnahmen Bescheid wissen.

##### 4.1 Aufnahmen mit Flugzeugen

Zuerst ist die Entscheidung zu treffen, ob mit einem photographischen System oder mit einem Abtaster aufgenommen werden soll. Wegen der sehr schlechten geometrischen Auflösung der für Flugzeuge verfügbaren Rotationsabtaster (3.2.1.2) fällt die Entscheidung meistens zugunsten photographischer Systeme. Die aufkommenden digitalen Zeilenkameras (3.2.2) können in Zukunft zu anderen Entscheidungen führen. Die photographischen Systeme schaffen auch die Voraussetzung einer genauen geometrischen Auswertung der Aufnahmen. Sind dagegen Wärmebilder gefragt, kommt der (Rotations-)abtaster zum Zuge (siehe auch 3.2.1.7). Mikrowellengeräte (3.4) werden noch sehr selten verwendet. Sie haben eine sehr schlechte geometrische Auflösung. Mikrowellenaufnahmen werden aber durch die Atmosphäre wenig beeinträchtigt und liefern von der Erdoberfläche Informationen, die photographische Systeme und Abtaster nicht bieten können (3.4.1).

##### 4.1.1 Photographische Aufnahmen

Wegen ihres großen Bildformates (23 x 23 cm<sup>2</sup>) wird die Meßkamera in der Regel einer Amateurkamera vorgezogen. Mit Amateurkameras kann man nur sehr kleine Interessensgebiete wirtschaftlich aufnehmen. Die Multispektralkamera (3.1.2) als sogenannte Mittelformatkamera steht dazwischen. Sie ist allerdings in der westlichen Welt wenig verbreitet.

##### 4.1.1.1 Flugplanung

Dabei beschränken wir uns auf Aufnahmen mit Meßkameras. Im Rahmen einer Flugplanung sind folgende Entscheidungen zu treffen:

a) Filmart: Da Farbfilme nicht nennenswert teurer als Schwarzweißfilme sind, wird dem Farbfilm gerne der Vorzug eingeräumt. Für die Erfassung der

Vegetation ist der Farbinfrarotfilm (3.1.1.4.4) dem normalen Farbfilm (3.1.1.4.3) vorzuziehen. Der Farbinfrarotfilm liefert auch die kontrastreicheren Aufnahmen (3.1.1.5). Die ungewohnte Farbdarstellung des Farbinfrarotfilmes sollte man in Kauf nehmen. Geringe Belichtungs- und Entwicklungsfehler bringen zwar eine zusätzliche Farbverschiebung, die aber bei einem "Falschfarbenfilm" keine größeren Probleme aufwirft. Bei der Verwendung eines normalen Farbfilmes treten in der Praxis verhältnismäßig große Schwierigkeiten bei der Belichtung und Entwicklung auf, denn das Auge ist für kleine Farbverschiebungen gegenüber den natürlichen Farben sehr empfindlich. Die Farbfilme haben jedoch einen wesentlichen Nachteil: Das Herstellen von Kopien auf Film oder Papier (3.1.1.7) ist verhältnismäßig aufwendig und teilweise in der Qualität unbefriedigend; auch photographische Folgeprodukte (z.B. die im Abschnitt 5.1.5 zu behandelnden Orthophotos) sind verhältnismäßig teuer.

Vom Schwarzweißfilm, der in der Regel als Negativfilm in der Meßkamera benutzt wird, kann man Kopien auf Film (Dia) und Papier in hoher Qualität preisgünstig anfertigen. Stehen nur geometrische Auswertungen und (billige) photographische Folgeprodukte im Vordergrund, werden deshalb bevorzugt Schwarzweißfilme benutzt. Es überwiegt der panchromatische Schwarzweißfilm, der die gesamte Landschaft verhältnismäßig gut differenziert wiedergibt. Ist nur die Vegetation auszuwerten, wird man Schwarzweiß-Infrarotfilme einsetzen (3.1.1.5).

b) Bildmaßstab: Mit der Wahl des Bildmaßstabes, der sich aus der Kammerkonstanten  $c$  und vor allem der Flughöhe  $h$  ergibt (Bild 3.1-6), beeinflusst man entscheidend die Wirtschaftlichkeit der Fernerkundung. Man will den Bildmaßstab einerseits möglichst klein wählen, um mit einer Aufnahme sehr große Bereiche zu erfassen, und andererseits möglichst groß wählen, um eine gute geometrische Auflösung und eine gute Genauigkeit für die Auswertung zu haben.

Für Interpretationsaufgaben haben wir im Abschnitt 3.1.1.6 bereits kennengelernt, wie der Bildmaßstab und die Größe der noch erkennbaren Details zusammenhängen. Bei einem geometrischen Auflösungsvermögen von 25 lp/mm für den Gesamtprozeß der Luftaufnahme ergab sich für einen Bildmaßstab  $1:m_b = 1:10000$  eine Größe der noch erkennbaren Details von 20 cm. Bei einem Bildmaßstab  $1:m_b = 1:20000$  wären es 40 cm usw. Das geometrische Auflösungsvermögen schwankt heute zwischen 25 lp/mm und 75 lp/mm, vor allem abhängig vom Objektkontrast, von der Filmart, von der Lage des Objektes innerhalb

des Bildformates (Mittellage ist besser als Randlage) und - bei niedrigen Flughöhen - vom Vorhandensein einer Bewegungskompensation (3.1.1.2.5). Die Schwierigkeit der Festlegung des Bildmaßstabes aus der Objektgröße und dem geometrischen Auflösungsvermögen besteht in der Praxis zusätzlich noch darin, daß man sich die Objektgröße innerhalb des zu interpretierenden Ensembles von Objekten schwer vorstellen kann. Die Verlichtung der Kronen von Nadelbäumen, also den stärkeren Verlust der Nadeln älterer Jahrgänge, erkennt man z.B. - wie erfahrene Interpreten berichten - optimal in Bildern mit Maßstäben größer als  $1:m_b = 1:6000$ . Das entspräche bei einem geometrischen Auflösungsvermögen von 50 lp/mm einer Objektgröße von  $6000/(50 \cdot 2) = 60 \text{ mm} = 6 \text{ cm}$ . Mit diesem Beispiel sollte gezeigt werden, daß die Wahl des Bildmaßstabes aufgrund des geometrischen Auflösungsvermögens in erster Linie aus praktischen Erfahrungen - eventuell gestützt auf Testaufnahmen - geschieht.

Für die Herstellung topographischer Karten wurde aus langjährigen Erfahrungen ein Zusammenhang zwischen dem Kartenmaßstab  $1:m_k$  und dem Bildmaßstab  $1:m_b$  gefunden. Er wird mit der folgenden Formel ausgedrückt:

$$m_b = k \sqrt{m_k}, \quad \text{wobei } k \text{ zwischen 200 und 300 schwankt, abhängig von den gestellten Anforderungen} \quad (4.1-1)$$

Für gängige Kartenmaßstäbe ergibt die Formel (4.1-1) folgenden Zusammenhang:

$1:m_k$	$m_b$
1:1000	6300 - 9500
1:5000	14000 - 21000
1:10000	20000 - 30000
1:25000	32000 - 47000
1:50000	45000 - 67000

Tab. 4.1-1: Zusammenhang zwischen Karten- und Bildmaßstab

In der Beziehung (4.1-1) sind sowohl die Genauigkeitsansprüche topographischer Karten als auch die Anforderungen enthalten, inwieweit der für topographische Karten erforderliche Inhalt aus Luftbildern interpretiert werden kann (nähere Details siehe A 4.4.1.3). Falls auch die thematischen Interpretationsergebnisse kartographisch dargestellt werden sollen, kann die Beziehung (4.1-1) ebenfalls ein Anhaltspunkt für die Wahl des Bildmaßstabes sein. Der Kartenmaßstab, in dem die thematischen Interpretationsergebnisse festgehalten werden sollen, ergibt sich nämlich häufig aus der Interpretationsaufgabe.



Falls von den Luftaufnahmen Orthophotos und/oder Stereoorthophotos (5.1.5) hergestellt werden sollen, ist bei der Wahl des Bildmaßstabes zu beachten, daß nur 3- bis 5-fache Vergrößerungen qualitativ hochwertige Produkte ergeben.

Bei der Wahl des Bildmaßstabes nimmt man häufig auf den Blattschnitt herzustellender oder bereits vorhandener Karten Rücksicht. Eine ideale Zuordnung ist z.B. gegeben, wenn ein Luftbild ein Kartenblatt deckt.

c) Kameratyp: Es stehen bekanntlich Kameras zur Auswahl mit einer Kammerkonstanten von 9 cm (Überweitwinkel), 15 cm (Weitwinkel), 21 cm (Zwischenwinkel) und 30 cm (Normalwinkel) (3.1.1.1). Im Hinblick auf die Verzerrungen der photographischen Bilder und insbesondere wegen der umgeklappten Häuser und Bäume am Bildrand (stürzende Linien) werden für thematische Interpretationsaufgaben die langbrennweitigen Kameras bevorzugt. Falls mit dem Bildmaterial auch eine höhenmäßige Auswertung (5.1.3 und 5.1.4) erfolgen soll, ist die Kammerkonstante möglichst klein zu wählen. Der Zwischenwinkel ist oft ein guter Kompromiß zwischen einer annehmbaren Höhen Genauigkeit und noch akzeptablen Bildversetzungen.

Schließlich ist noch zu erwähnen, daß eine kleine Kammerkonstante auch niedrigere Flughöhen erlaubt, sodaß weniger Atmosphäre mit ihren qualitätsmindernden Einflüssen vorhanden ist.

d) Streifenweise Anordnung der Aufnahmen: Nach Festlegung des Bildmaßstabes  $1:m_b$  und der Kammerkonstanten  $c$  ist nach (3.1-1) die Flughöhe  $H^1$  festgelegt. Diese Flughöhe bezieht sich auf das Gelände; es ist eine Flughöhe über Grund. Der Pilot benötigt die absolute Flughöhe  $Z_0$ , die durch Hinzufügen der Geländehöhe  $Z$  zur Flughöhe  $H$  enthalten wird. Diese und noch weitere Beziehungen sind in der folgenden Tabelle zusammengefaßt, zu der das Bild 4.1-2 gehört.

---

<sup>1</sup> Ab hier wird die Flughöhe mit  $H$  bezeichnet.

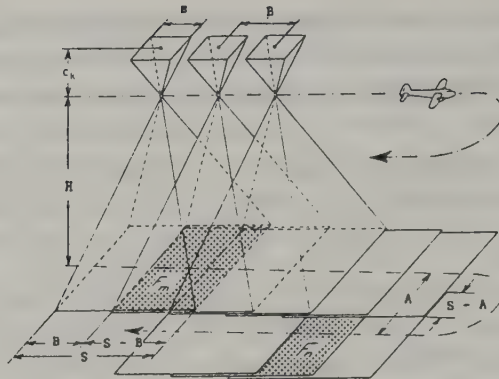


Bild 4.1-2: Zur Geometrie der Flugplanung bei ebenem Gelände (entnommen aus Albertz/Kreiling, 1980)

Bildmaßstabszahl	$m_b = H/c$
Bildseite im Gelände	$S = s \cdot m_b$
Basis im Bild	$b = B/m_b$
Flughöhe über Grund	$H = c \cdot m_b$
Absolute Flughöhe	$Z_o = H + Z$
Längsüberdeckung (%)	$l = \frac{S-B}{S} 100 = (1 - \frac{B}{S}) 100$
Querüberdeckung (%)	$q = \frac{S-A}{S} 100 = (1 - \frac{A}{S}) 100$
Gelände <u>fläche</u> eines Bildes	$F_b = S^2 = s^2 \cdot m_b^2$
Basislänge bei 1% Längsüberdeckung	$B = S(1 - \frac{1}{100})$
Streifenabstand bei q% Querüberdeckung	$A = S(1 - \frac{q}{100})$
Stereoskopisch erfaßte Modell <u>fläche</u>	$F_m = (S - B) \cdot S$
Im Block pro Modell neu erfaßte <u>Fläche</u>	$F_n = A \cdot B$

Tab. 4.1-3: Formeln für die Flugplanung

Bei einer stereoskopischen Deckung wird die Längsüberdeckung  $l = 60\%$  und bei einer Monodeckung etwa  $l = 20\%$  gewählt. Die Querüberdeckung beträgt etwa  $q = 25\%$ . Der mit Bildern stereoskopisch erfaßte Bereich  $F_m$  wird als

Stereomodell - oder nur als Modell - bezeichnet. Stereodeckung verbessert die Interpretationssicherheit erheblich gegenüber einer Monodeckung. Ist aus den Luftbildern auch die Geometrie der (räumlichen) Objekte auszuwerten, ist unbedingt Stereodeckung erforderlich. Im gebirgigen Gelände ist zu beachten, daß die Gipfelbereiche mit  $l = 60\%$  und  $q = 25\%$  zu erfassen sind. In den Talbereichen ergeben sich dann wesentlich größere Überdeckungswerte.

Zahlenbeispiel: Ein Bildverband wird mit einer Längsüberdeckung  $l = 60\%$  und einer Querüberdeckung  $q = 25\%$  geflogen. Die Flughöhe  $H$  über Grund beträgt 2000 m. Es wird eine Zeiss RMK 30/23 benutzt. Daraus folgen:

Bildmaßstabszahl	$m_b = 2000/0.30 = 6670$
Bildseite im Gelände	$S = 0.23 \cdot 6670 = 1530 \text{ m}$
Basis im Gelände	$B = 1530(1 - 60/100) = 610 \text{ m}$
Basis im Bild	$b = 610/6670 = 0.091 \text{ m}$
Streifenabstand im Gelände	$A = 1530(1 - 25/100) = 1150 \text{ m}$
Geländefläche eines Bildes	$F_b = 1.53^2 = 2.34 \text{ km}^2$
Fläche des Stereomodelles	$F_m = (1.53 - 0.61) \cdot 1.53 = 1.41 \text{ km}^2$
Modellfläche im Block	$F_n = 0.61 \cdot 1.15 = 0.70 \text{ km}^2$

e) Bodenbeobachtungen: Beim Einsatz photographischer Systeme werden im Zeitpunkt des Überfluges in der Regel keine Bodenbeobachtungen durchgeführt. Damit kann der Bildinhalt grundsätzlich nur relativ gedeutet werden. Nachträgliche Begehungen des Geländes mit dem Bildmaterial schaffen die nötigen Referenzen.

Im Sinne des Einsatzes der "Photographie als Strahlungsmesser" (3.1.1.3) ist es erforderlich, zur Ermittlung der Einflüsse der Atmosphäre im Zeitpunkt des Bildfluges meteorologische Parameter zu messen (3.5.3).

Auch die Ermittlung spektraler Signaturen der zu interpretierenden Objekte kann die Interpretationsergebnisse erheblich verbessern. Diese punktuellen Messungen (3.5.4) müssen nicht unbedingt zur selben Zeit wie der Bildflug durchgeführt werden.

Für die geometrische Auswertung der Bilder benötigt man innerhalb des gesamten Bildverbandes einige Paßpunkte (5.1.6), deren Koordinaten mit Strecken- und/oder Winkelmeßgeräten in der Örtlichkeit zu bestimmen sind. Für höchste Genauigkeitsansprüche werden diese Paßpunkte unmittelbar vor dem Bildflug signalisiert (weitere Details zur Signalisierung siehe B 2.2).

Aufgabe 4.1-1: Man setze das Zahlenbeispiel fort mit der Fragestellung, wieviele Bilder man für einen 7.32 km langen Streifen und wieviele Streifen man für einen 4.6 km breiten Block benötigt.

Aufgabe 4.1-2: Man wiederhole das Zahlenbeispiel unter der Annahme, daß an-

stelle der RMK 30/23 die RMK 15/23 benutzt wird. Bei der ersten Berechnung soll die Flughöhe mit 2000 m beibehalten und bei der zweiten Berechnung  $H = 1000$  m gewählt werden.

Aufgabe 4.1-3: Man wiederhole das Zahlenbeispiel mit der Vorgabe, daß der Bildmaßstab 1:5000 sein soll und deshalb die Flughöhe niedriger zu wählen ist.

#### 4.1.1.2 Bildflugzeuge

In der folgenden Tabelle sind einige der gebräuchlichen Typen von Bildflugzeugen angeführt. Grundsätzlich kann man natürlich durch Einbau einer Bodenluke aus jedem Flugzeug ein Bildflugzeug machen. Bei der Auswahl beachtet man jedoch gewisse Leistungsparameter: Für großmaßstäbige Aufnahmen werden relativ langsam fliegende Maschinen bevorzugt, für das rasche Erreichen des Einsatzgebietes und der Einsatzhöhe werden wieder hohe Reisegeschwindigkeit und hohe Steiggeschwindigkeit gewünscht. Da An- und Abflug große Kosten verursachen und ein Flugauftrag auch möglichst mit einem Einsatz ausgeführt werden soll, wird eine möglichst große Flugdauer verlangt. Ab Flughöhen von 3500 m ist bei offener Luke mit Sauerstoffmaske zu fliegen. Ab 6000 m sind Druckkabinen erforderlich. Die Bodenluke ist dann durch ein teures, optisches Bodenabschlußglas, das keine zusätzliche Verzeichnung bringen darf, zu verschließen.

Hersteller	Herstellungsland	Typ	Motorenanzahl	Flügelanordnung 1)	Min.Startbahnlänge 2)	Steiggeschw. [m/s] 2)	max. Steighöhe [m]	Bildfluggeschw. in 3000 m [km/h]	Flugdauer [h:min]	Anmerkung
Pilatus	CH	Turbo Porter PC-6	1	H	235	7	8200	170-310	6:30	
Cessna	USA	Skywagon TU 206	1	H	550	5	8000	170-250	7:30	
Dornier	D	Skyservant DO 28-D	2	H	510	6	7300	220-270	6:40	
Rockwell	USA	Commander 685	2	H	750	8	7300	200-330	6:00	Druckkabine
Beech	USA	Super King Air 200	2	T	790	12	10000	260-430	8:30	Druckkabine
Gates	USA	Lear Jet 25D	2	T	840	40	15500	600-800	9:40	Druckkabine

1) H = Hochdecker, T = Tiefdecker

2) in Meereshöhe, 15°C, 15 m Endhindernis

Tab. 4.1-4: Gebräuchliche Bildflugzeuge

Die Bildflugmannschaft besteht aus Pilot und eventuell Kopilot, Kameraoperator und eventuell Bildflugnavigator. Heute wird meistens zu dritt geflogen. Für die Bildflüge muß in Mitteleuropa jede Schönwetterlage optimal genutzt werden. Man kommt auf kaum mehr als insgesamt 300 Flugstunden bei etwa 120 Bildflügeinsätzen je Maschine und Jahr, woraus folgt, daß eine Flugstunde verhältnismäßig teuer ist.

#### 4.1.1.3 Luftbildarchive

Seit Anfang der 50er Jahre werden im großen Umfang Luftbilder aufgenommen. Sie werden von den Auftraggebern oder von den privaten oder öffentlichen Stellen, die die Aufnahmen machen, archiviert. Der Informationsgehalt dieser Aufnahmen ist in einer umweltbewußten Zeit besonders wertvoll. Sie sind ein objektives Dokument der Umwelt zum Zeitpunkt des Bildfluges.

Die Wiederholungsaufnahmen, die in Abständen von einigen Jahren vorhanden sein können, liefern Zeitreihen, die die Veränderungen der Umwelt dokumentieren. Für die Auswertung aktueller Problemstellungen sind sie aus den Archiven zu holen, und zwar in der Regel in Form von Kopien.

In Österreich sind ca. 90% der Luftaufnahmen im Archiv des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen in Wien. In der BRD registrieren das Institut für Angewandte Geodäsie in Frankfurt und teilweise auch die Landesvermessungsämter die Befliegungen, die in der BRD in der Regel von Privatfirmen durchgeführt werden (Schmidt-Falkenberg, 1979). In der Schweiz gibt es ebenfalls keine zentrale Archivierung, aber es werden alle Stereo-Luftbildaufnahmen - sowohl von amtlicher als auch privater Seite - von der Eidgenössischen Vermessungsdirektion, Bern, dokumentiert.

#### 4.1.2 Aufnahmen mit Abtastern

Im Rahmen der Flugplanung ist vor allem die Flughöhe H festzulegen. Bei Scanneraufnahmen geht man bevorzugt vom geometrischen Auflösungsvermögen aus. Der Gedankengang soll anhand des folgenden Beispiels vollzogen werden: Die an der Geländeoberfläche austretenden Gesteinsschichten, die sich besonders durch unterschiedliche Temperaturen auszeichnen, sollen mit Thermalaufnahmen (Daedalus AADS1285, Tab. 3.2-19) kartiert werden. Die einzelnen Gesteinsschichten haben eine Breite von mindestens 1.5 m, d.h. ein Streifenpaar hat eine Breite von 3 m. Die Bildelementgröße  $\Delta Y$  muß dann laut (3.2-14) kleiner sein als  $\Delta Y < 3/1.4 = 2.1$  m. Falls unverfälschte Bildelemente erwartet werden, muß die Bildelementgröße  $\Delta Y$  laut (3.2-15) kleiner sein als  $\Delta Y < 3.0/2.8 = 1.1$  m. Mittels Gleichung (3.2-2) findet man die dazugehörige Flughöhe:  $H = 2.1 \cdot \cos(43 \text{ gon})^2 / 0.0025 = 512$  m. Für unverfälschte Bildelemente darf die Flughöhe nur halb so groß sein. Damit kann auf Grund der Beziehung (3.2-1) auch die Fluggeschwindigkeit V bzw. die Abtastfrequenz  $\nu$  berechnet werden.

Ein zweiter Anhaltspunkt für die Flughöhe ist die Bildelementgröße im pho-



tographischen Produkt, das aus dem digitalen Bild häufig erzeugt wird (6.3). Ein photographisches Bild sollte man nicht mit Bildelementen größer als 0.2 mm herstellen. Wird z.B. ein photographisches Produkt 1:5000 angestrebt, sollte die Bildelementgröße  $\Delta Y$  nicht größer sein als  $\Delta Y = 0.2 \cdot 5000 = 1000 \text{ mm} = 1 \text{ m}$ . Daraus kann nach den oben angestellten Überlegungen ebenfalls die Flughöhe abgeleitet werden.

Die Bodenbeobachtungen spielen bei Thermalaufnahmen eine wichtige Rolle. Um die aus den Referenzstrahlern ermittelten Temperaturwerte mit Hilfe eines Atmosphärenmodelles korrigieren zu können, benötigt man Daten über die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit der Atmosphäre (siehe Bild 3.2-21). Für eine weitere Verbesserung der Resultate sollte man nach Möglichkeit simultan mit dem Überflug an Probeflächen die Temperatur und/oder den Emissionsgrad (3.2.1.6) messen, insbesondere wenn Gewässer aufgenommen werden. Da die Temperatur ein Phänomen ist, das sich kurzperiodisch ändert, ist die Forderung der Gleichzeitigkeit von Befliegung und Bodenbeobachtung verhältnismäßig streng einzuhalten.

In der (feuchten) Atmosphäre vorhandene Wolken sind für Thermalaufnahmen ebenfalls ein Hindernis. Dagegen sind Rauchwolken bei einem (Wald-)Brand für die Thermalstrahlung transparent. Thermalaufnahmen werden bevorzugt in der Nacht erfliegen. Eine Gegenüberstellung von Tag- und Nachtbefliegungen liefert den für viele Aufgabenstellungen wichtigen Temperaturgang.

Bei einem Flug mit einem Abtaster werden den Piloten andere Bedingungen gestellt als bei einem Flug mit einem photographischen System. Bei photographischen Systemen ist nur im Augenblick der kurzen Belichtung eine Ruhelage des Flugzeuges erforderlich; bei Scanneraufnahmen darf der Pilot während des gesamten Fluges keine ruckartigen Bewegungen ausführen. Solche kurzperiodischen Störungen können auch bei einer anschließenden geometrischen Rektifizierung (6.4.2) nicht vollständig eliminiert werden.

Aufgabe 4.1-4: Mit dem Abtaster AADS1268 der Fa. Daedalus (Öffnungswinkel  $\Delta\alpha = 1.25 \text{ mrad}$ ) sollen die Zeilen eines Maisfeldes, die einen Abstand von 40 cm haben, aufgenommen werden. Wie ist die Flughöhe zu wählen, damit man die Zeilen im Multispektralbild erkennt?

#### 4.1.3 Mikrowellen-Aufnahmen

Die passiven Mikrowellengeräte spielen in der Praxis eine noch geringere Rolle als die aktiven Mikrowellengeräte. Wir beschränken uns daher auf einige Hinweise zu SAR-Kampagnen (3.4.3.2). Nicht unerwähnt darf bleiben, daß die Bildentstehung aus den bei SAR-Missionen aufgezeichneten Informationen besonders schwierig und zeitaufwendig ist.

Die große Bedeutung der Mikrowellengeräte liegt in ihrer Unabhängigkeit von den meteorologischen Parametern und von der Sonnenstrahlung. Man spricht deshalb auch von Allwettergeräten. Große Bedeutung haben die Mikrowellenaufnahmen für Kartierungen in tropischen Regenwäldern erhalten, die wegen der ständigen Wolkenbedeckung mit photographischen Systemen und mit Abtastern nicht aufgenommen werden können.

Von der Entstehung her sind RADAR-Aufnahmen mit den Scanner-Aufnahmen vergleichbar. Das Bild entsteht dynamisch während des Fluges. Bei nichtkohärenten RADAR-Aufnahmen ist die Bildelementgröße in Flugrichtung ( $\hat{= \Delta X$ ) von der Flughöhe abhängig; bei SAR-Aufnahmen ist die Bildelementgröße in beiden Richtungen unabhängig von der Flughöhe.

Für die Interpretation der RADAR-Aufnahmen kann eine Stereodeckung gute Dienste leisten. RADAR-Stereobilder bekommt man einmal dadurch, daß man den Hin- und Rückflug in gleicher Höhe anordnet und das seitwärts aufgenommene Gebiet in die Mitte der beiden Flugrouten legt. Wegen der sehr unterschiedlichen Bestrahlungsrichtung machen diese Aufnahmen bei der stereoskopischen Betrachtung oftmals Schwierigkeiten. Für eine bequemere stereoskopische Betrachtung ist es daher besser, die beiden Aufnahmen in unterschiedlicher Flughöhe übereinander durchzuführen und das Gelände von der gleichen Richtung, aber aus unterschiedlicher Höhe, mit den RADAR-Impulsen abzutasten. (Curran, 1985, mit vielen Literaturhinweisen, Leberl, 1979).

#### 4.2 Aufnahmen mit Satelliten

Bevor die einzelnen Satelliten mit ihren Sensoren besprochen werden, ist eine kurze Einführung in die Wahl der Bahnparameter für erderkundende Satelliten angebracht.

##### 4.2.1 Bahnparameter

Da die Größe der Bildelemente (bei Abtastern) bzw. der Bildmaßstab (bei photographischen Systemen) während des gesamten Umlaufes der Plattform um die Erde möglichst konstant sein soll, wird in der Regel eine kreisförmige Umlaufbahn der erderkundenden Satelliten bevorzugt. Eine elliptische Bahn wählt man nur ausnahmsweise; sie erlaubt entlang eines Teiles der Umlaufbahn sehr geringe Flughöhen.\*

In den folgenden Betrachtungen wird zunächst eine kugelförmige Erdfigur vorausgesetzt. Bei einer kugelförmigen Erde, deren Schalen gleiche Dichte haben müssen, aber von Schale zu Schale unterschiedliche Dichte haben dürfen, greifen am Satelliten folgende Kräfte an, die in einem Gleichgewichtszustand sein müssen (Bild 4.2-1):

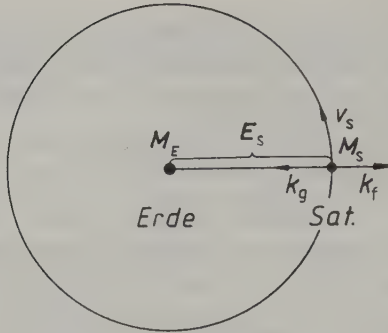


Bild 4.2-1: Kreisbahn des Satelliten um den Erdschwerpunkt

Zentripetalkraft  $k_g$  nach dem Gravitationsgesetz:

$$k_g = G \frac{M_E \cdot M_S}{E_S^2} \quad (4.2-1)$$

$G = 6.672 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$   $\hat{=}$  Gravitationskonstante  
 $E_S$   $\hat{=}$  Entfernung des Satelliten vom Erdschwerpunkt  
 $M_E$   $\hat{=}$  Masse der Erde  
 $M_S$   $\hat{=}$  Masse des Satelliten

Fliehkraft des mit der Geschwindigkeit  $v_S$  auf der Kreisbahn sich bewegenden Satelliten:

$$k_f = \frac{v_S^2 \cdot M_S}{E_S} \quad (4.2-2)$$

Gleichsetzen von (4.2-1) und (4.2-2) ergibt:

$$v_S^2 = \frac{G \cdot M_E}{E_S} \quad (4.2-3)$$

Für  $G \cdot M_E$  kann eine neue Konstante  $\mu$ , die geozentrische Gravitationskonstante, eingeführt werden, die - nebenbei bemerkt - mit der mittleren Erdbeschleunigung  $g_E = 9.80665 \text{ m/s}^2$  und dem Erdradius  $R_E$  näherungsweise wie folgt zusammenhängt:

$$\mu = G \cdot M_E = g_E \cdot R_E^2 = 3.986005 \cdot 10^{14} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} \quad (4.2-4)$$

Anstelle der Bahngeschwindigkeit  $v_S$  soll in (4.2-3) außerdem noch die Winkelgeschwindigkeit  $\dot{\omega}_S$  des Satelliten eingeführt werden. Mit  $v_S = E_S \cdot \dot{\omega}_S$  und (4.2-4) erhält man die wichtige Beziehung:

$$\dot{\omega}_S = \sqrt{\mu/E_S^3} \quad (4.2-5)$$

Mit ihrer Hilfe kann die Dauer  $T_S$  eines gesamten Umlaufes des Satelliten um die Erde angegeben werden:

$$T_S = 2\pi/\dot{\omega}_S = 2\pi\sqrt{E_S^3/\mu} \quad (4.2-6)$$

Wir sehen daraus, daß die Masse des Satelliten keinen Einfluß auf die Umlaufzeit hat. Die Umlaufzeit hängt nur von der Entfernung  $E_S$  des Satelliten vom Erdschwerpunkt ab. (Gleichung (4.2-6) ist das 3. Keplersche Gesetz, angewandt auf eine Kreisbahn.)

Zahlenbeispiel: Welche Umlaufzeit hat ein 700 km über der Erdoberfläche kreisender Satellit? Die Entfernung  $E_S$  setzt sich zusammen aus  $E_S = R_E + 700 = 6370 + 700 = 7070$  km. (4.2-6) mit Beachtung von (4.2-4) ergibt:

$$T_S = 2\pi\sqrt{7070^3 \cdot 10^9 / 3.986005 \cdot 10^{14}} = 5913 \text{ s} \approx 100 \text{ min}$$

In der Praxis ist die umgekehrte Aufgabenstellung meistens interessanter: Man wünscht sich eine gewisse Umlaufzeit und fragt nach der erforderlichen Flughöhe  $H$  des Satelliten. Mit  $E_S = R_E + H$  und kleinen Umformungen folgt aus (4.2-6):

$$H = \sqrt[3]{\mu(T_S/2\pi)^2} - R_E \quad (4.2-7)$$

Damit haben wir u.a. die Voraussetzungen zur Beantwortung der wichtigen Frage geschaffen, in welcher Höhe ein Satellit fliegen muß, damit seine Winkelgeschwindigkeit  $\dot{\omega}_S$  und die Winkelgeschwindigkeit  $\dot{\omega}_E$  der Erde identisch sind, d.h. damit sich der Satellit mit der Erde dreht (geosynchrone Umlaufbahn). Die dazugehörige Flughöhe  $H$  beträgt:

$$H = \sqrt[3]{3.986005 \cdot 10^{14} (86164.1/2\pi)^2} - 6370000 \approx 35800000 \text{ m} = 35800 \text{ km}$$

Dabei ist für eine Erdumdrehung bzw. einen Satellitenumlauf, also für einen Tag  $T$ , die Dauer eines Sterntages, das sind 86164.1 s, anzusetzen. Dieser Sterntag, der eine Erdumdrehung gegenüber dem (stationären) Frühlingspunkt (siehe Erläuterungen zu Formel (4.2-12)) - allgemeiner: gegenüber den Fixsternen - festlegt, ist bekanntlich etwas kürzer als ein mittlerer Sonnentag, der 86400 s dauert.

Es soll nun die Satellitenbahn relativ zur Erde etwas detaillierter festgelegt werden (Bild 4.2-2). Die Bahnebene des Satelliten schneidet die Äquatorebene entlang einer Geraden durch den Erdmittelpunkt und den Knotenpunkt K. Der Neigungswinkel der Satellitenbahn gegenüber der Äquatorebene wird mit Inklination  $i$  bezeichnet.





sind. Der Nullpunkt der Zeitskala  $t$  wird in den Knotenpunkt  $K$  gelegt, d.h.  $t = 0$ , wenn der Satellit (erstmals) die Äquatorebene überfliegt. Der Nullmeridian der geographischen Länge  $\lambda_t$  wird der Einfachheit halber ebenfalls in den Meridian durch den Knotenpunkt  $K$  zum Zeitpunkt  $t = 0$  gelegt. Infolge der Erddrehung mit der Winkelgeschwindigkeit  $\dot{\omega}_E$  wandert der Nullmeridian ( $\lambda_t = 0$ ) in bezug zum (stationären) Knoten  $K$  ostwärts.

Aus dem rechtwinkligen sphärischen Dreieck mit der Seite  $\overline{K, Sat}$  als Hypotenuse können die folgenden Beziehungen abgelesen werden:

$$\tan(\dot{\omega}_E \cdot t + \lambda_t) = \cos(i) \tan(\dot{\omega}_S \cdot t) \quad (4.2-8)$$

$$\sin \phi_t = \sin(i) \sin(\dot{\omega}_S \cdot t) \quad (4.2-9)$$

Bei der Diskussion dieser Beziehungen beginnen wir mit der geographischen Breite  $\phi_t$ . Wir sehen aus (4.2-9), daß  $\phi_t$  nach einer Arcussinusfunktion verläuft.

Ist die Inklination  $i = 0$ , d.h. fliegt der Satellit in der Äquatorebene, und ist  $\dot{\omega}_S = \dot{\omega}_E$ , dann haben wir es mit geostationären Satelliten zu tun. Diese spezielle Konstellation wird für Nachrichten- und Wettersatelliten gerne verwendet. Bei geostationären Satelliten wird  $\lambda_t = 0$ , wie aus (4.2-8) für  $i = 0$  und  $\dot{\omega}_E = \dot{\omega}_S$  hervorgeht.

**Zahlenbeispiel:** Eine Satellitenbahn habe eine Inklination  $i$  von  $80^\circ$ . Die Winkelgeschwindigkeit  $\dot{\omega}_S$  des Satelliten sei dreimal so groß wie die Rotationsgeschwindigkeit  $\dot{\omega}_E$  der Erde. Drei Umläufe des Satelliten entsprechen also einer Erdumdrehung. Man berechne  $\phi_t, \lambda_t$  nach einer 1/5-Drehung, nach einer 1 1/5-Drehung, nach einer 2 1/5-Drehung und nach einer 3 1/5-Drehung des Satelliten.

$$1/5\text{-Drehung: } \tan\left(\frac{2\pi}{5 \cdot 3} + \lambda_t\right) = \cos 80^\circ \tan\left(\frac{2\pi}{5}\right) \rightarrow \lambda_t = 4.12^\circ$$

$$\sin \phi_t = \sin 80^\circ \sin\left(\frac{2\pi}{5}\right) \rightarrow \phi_t = 69.49^\circ$$

(dieser Wert für  $\phi_t$  ergibt sich auch bei den folgenden Satellitenpositionen)

$$1 \text{ } 1/5\text{-Drehung: } \tan\left(\frac{2\pi}{5 \cdot 3} + \frac{2\pi}{3} + \lambda_t\right) = \cos 80^\circ \tan\left(\frac{2\pi}{5} + 2\pi\right) \rightarrow \lambda_t = 244.12^\circ$$

$$2 \text{ } 1/5\text{-Drehung: } \tan\left(\frac{2\pi}{5 \cdot 3} + \frac{4\pi}{3} + \lambda_t\right) = \cos 80^\circ \tan\left(\frac{2\pi}{5} + 4\pi\right) \rightarrow \lambda_t = 124.12^\circ$$

$$3 \text{ } 1/5\text{-Drehung: } \tan\left(\frac{2\pi}{5 \cdot 3} + 2\pi + \lambda_t\right) = \cos 80^\circ \tan\left(\frac{2\pi}{5} + 6\pi\right) \rightarrow \lambda_t = 4.12^\circ$$

Aus dem Zahlenbeispiel folgt die Erkenntnis, daß der Satellit nach einem Tag wieder auf die gleiche Bahn in bezug zur Erdoberfläche kommt. Die

Bedingung für die sogenannten Eintagswiederholer (one-day repeaters) lautet allgemein:

$$n = \frac{\dot{\omega}_S}{\omega_E} \quad n \in \mathbb{N} \quad (4.2-10)$$

Ist das Verhältnis  $n$  der Winkelgeschwindigkeiten nicht ganzzahlig, also  $n \in \mathbb{R}^+$ , dann sind die Satellitenbahnen aufeinanderfolgender Tage gegeneinander versetzt. Für die Erderkundung benötigen wir aber Satelliten, die nach einem bestimmten Zeitintervall, z.B. bei den Eintagswiederholern nach einem Tag, wieder die gleichen Bereiche überfliegen.

Damit liegt der Gedanke nahe, die Winkelgeschwindigkeit  $\dot{\omega}_S$  des Satelliten so festzulegen, daß von Tag zu Tag immer die gleichen Bahnen auf der Erdoberfläche überstrichen werden. Die folgende Überschlagsrechnung zeigt aber, daß diese Forderung nicht erfüllbar ist, wenn die gesamte Erdoberfläche flächendeckend mit einer guten geometrischen Auflösung aufgenommen werden soll:

Zahlenbeispiel: Unter der Annahme, daß der Sensor im Satelliten einen Streifen mit einer Breite von 200 km aufnimmt, sind pro Tag  $40075/200 = 200$  Umläufe erforderlich. Daraus ergibt sich nach (4.2-10) eine Winkelgeschwindigkeit  $\dot{\omega}_S$  des Satelliten von:  $\dot{\omega}_S = 200 \cdot \omega_E$  bzw. eine Umlaufzeit  $T_S$  des Satelliten von  $86164.1/200 \approx 432$  s. Da  $E_S > R_E$  sein muß, muß aufgrund der Beziehung (4.2-6) die Umlaufzeit  $T_S$  aber größer sein als  $T_S > 2\pi \sqrt{6370^3/398600.5} = 5057$  s.

Das Problem kann man dadurch lösen, daß man auf die tägliche Wiederholung verzichtet und sich mit einer Wiederholung nach einigen Tagen begnügt. Die ganze Zahl  $n$  (4.2-10) ist deshalb in zwei Größen  $n_T$  und  $n_U$  aufzuspalten:

$$\boxed{n = n_T \cdot n_U} \quad n, n_T \in \mathbb{N} \quad n_U \in \mathbb{R}^+ \quad (4.2-11)$$

$n_T \hat{=}$  Anzahl der Tage für die gewünschte Wiederholung

$n_U \hat{=}$  Umläufe pro Tag, wobei  $n_U$  nicht ganzzahlig gewählt wird, um eine Versetzung der Bahnen der benachbarten Tage zu bekommen.

Für einen der bekanntesten Erderkundungssatelliten, nämlich für LANDSAT (4.2.2), sind die Verhältnisse eines sogenannten Mehrtagswiederholers (multiday repeater) im Bild 4.2-4 wiedergegeben. Dabei ist  $n = 251$ , also die Anzahl der Umläufe zwischen zwei identischen Bahnen beträgt 251. Die Größe  $n$  wird aufgeteilt in  $251 = 18 \cdot 13.94$ . Nach 18 Tagen kommt der Satellit wieder auf identische Bahnen. An einem Tag vollzieht der Satellit 13.94 Umläufe. Für etwa einen Tag sind die Bahnhälften der Umläufe im Bild 4.2-4

dargestellt. Ihre Abstände auf dem Äquator betragen  $40075/13.94 = 2874$  km. Die 15. Bahn ist gegenüber der 1. Bahn um  $2874 \cdot 0.05 = 160$  km versetzt. Die 16. Bahn ist gegenüber der 2. Bahn ebenfalls um 160 km versetzt usw.

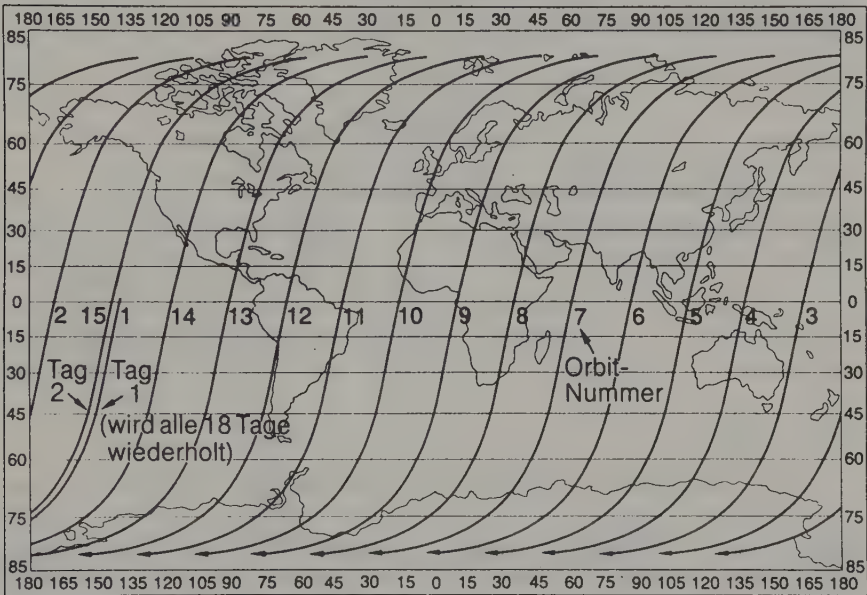


Bild 4.2-4: 14 Bahnhälften eines LANDSAT für einen Tag und die 15. Bahn für den darauffolgenden Tag (entnommen aus Diercke Weltraum-Atlas, 1981)

In unseren Betrachtungen haben wir bisher die Sonne außer acht gelassen. Sie spielt bei Erderkundungssatelliten, die Sensoren für reflektierte Strahlung an Bord haben, aber eine entscheidende Rolle. Man wünscht sich zum Zeitpunkt des Satellitenüberfluges immer den gleichen Sonnenstand. Dieser Wunsch kann bezüglich der jahreszeitlichen Schwankungen des Sonnenstandes nicht erfüllt werden. Dagegen gelingt es - wie im folgenden ausgeführt wird - die tageszeitlichen Schwankungen weitgehend auszuschalten. Das Ziel ist erreicht, wenn der Satellitenüberflug jeweils zur gleichen Ortszeit stattfindet.

Im Bild 4.2-5 ist die Bedingung für gleiche Ortszeit bei Wiederholungsaufnahmen skizziert: die Ebene der Satellitenbahn muß in bezug zur Geraden

Sonne-Erde unverändert bleiben. Zu diesem Zweck muß sich die Satellitenbahn im Jahr einmal um die Sonne drehen. Man spricht dann von einer sonnensynchronen Umlaufbahn. Das für eine Drehung der Satellitenbahn erforderliche Drehmoment liefert die Abplattung der Erde, wenn man die Inklination  $i \neq 90^\circ$  wählt. Auf ein solches äußeres Drehmoment antwortet der Satellit mit einer Präzessionsbewegung.

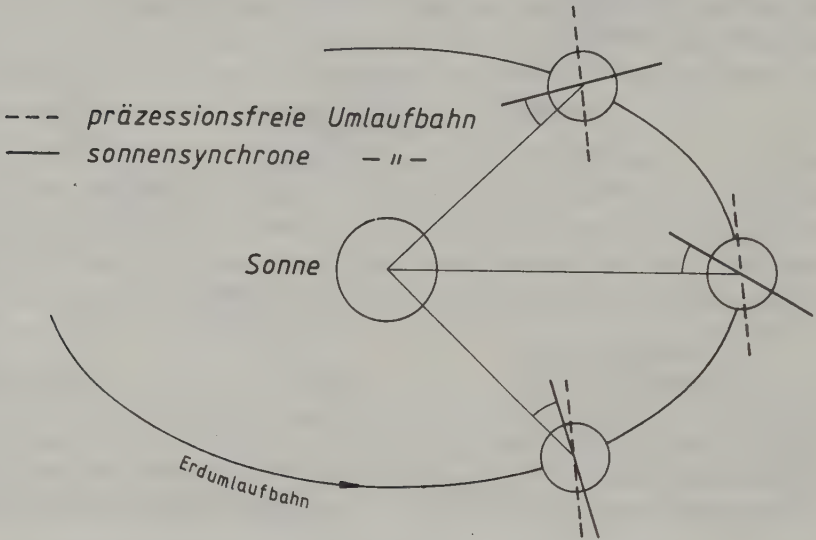


Bild 4.2-5: Präzessionsfreie und sonnensynchrone Satellitenumlaufbahn

Eine Näherungsbeziehung für die Präzession lautet:

$$\dot{\alpha}_K = -63.5 \left( \frac{R_E}{R_E + H} \right)^{7/2} \cos(i) \quad (4.2-12)$$

$\dot{\alpha}_K$  = Winkelgeschwindigkeit (Radiant/Jahr) des Knotens K in bezug zum Frühlingspunkt T, wobei  $\alpha_K$  die Rektaszension des Knotens K ist (Bild 4.2-6). (Die Rektaszension ist ein Winkel in der Äquatorebene mit einem Schenkel in der Schnittgeraden Ekliptik-Äquator, die zum Frühlingspunkt T zeigt.)

$R_E$  = mittlerer Erdradius, der mit 6378 km anzunehmen ist.

$H$  = Höhe des Satelliten über der Erdoberfläche

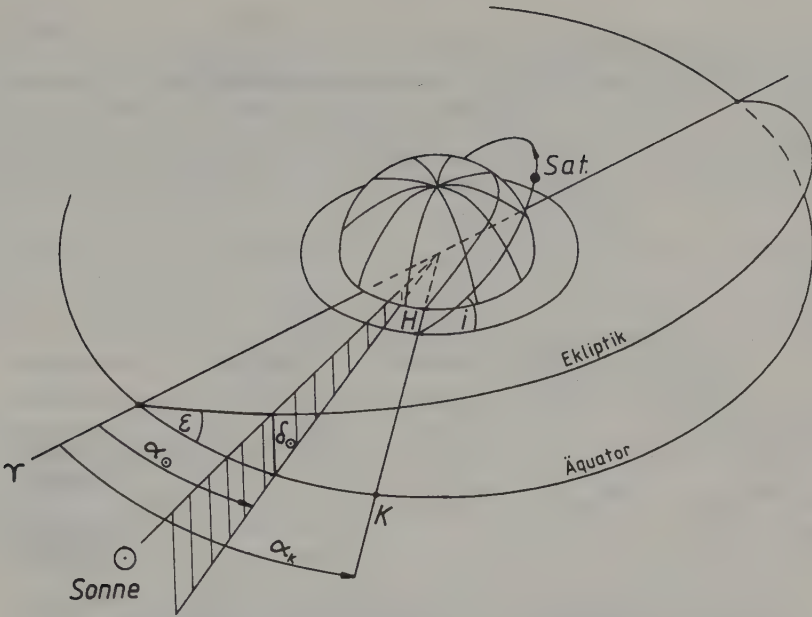


Bild 4.2-6: Orientierung der Satellitenbahn in Bezug zur Sonne

**Zahlenbeispiel:** Eine Satellitenbahn hat eine Inklination  $i = 40^\circ$  und eine Flughöhe  $H = 2000$  km. Man berechne die Winkelgeschwindigkeit  $\dot{\alpha}_K$  des Knotens K.

$$(4.2-12): \dot{\alpha}_K = -63.5 \left( \frac{6378}{8378} \right)^{7/2} \cos 40^\circ = -18.7 \text{ Radiant/Jahr,}$$

das entspricht  $-18.7/2\pi \approx 3$  Umdrehungen/Jahr

Aus dem Bild 4.2-6 sehen wir, daß für eine sonnensynchrone Satellitenumlaufbahn die Differenz zwischen Rektaszension  $\alpha_K$  des Knotens und Rektaszension  $\alpha_0$  der Sonne konstant sein muß. Da die mittlere Winkelgeschwindigkeit  $\dot{\alpha}_0$  der Sonne  $2\pi/\text{Jahr}$  ist, muß man die Parameter  $i$  und  $H$  der Satellitenbahn so wählen, daß nach (4.2-12) die Winkelgeschwindigkeit  $\dot{\alpha}_K$  des Knotens ebenfalls  $2\pi/\text{Jahr}$  ist. Da zur Erlangung eines gewünschten Wiederholungszyklus bereits über die Flughöhe  $H$  mittels Gleichung (4.2-7) verfügt wird, zieht man für die gewünschte Präzession den Bahnparameter  $i$  heran. Im Bild 4.2-7 ist für verschiedene Inklinationen  $i$  und Flughöhen  $H$  die Winkelgeschwindigkeit  $\dot{\alpha}_K$  - berechnet aus (4.2-12) - der Präzession dargestellt, wobei noch zusätzlich eine Skala für die Differenzen zwischen der Winkelgeschwindigkeit  $\dot{\alpha}_K$  des Knotens K und der Winkelgeschwindigkeit  $\dot{\alpha}_0$  der Sonne angegeben ist. Für das berechnete Zahlenbeispiel ( $i = 40^\circ$ ,  $H = 2000$  km) ist die Winkelgeschwindigkeit  $-18.7$  Radiant/Jahr aus dem Bild 4.2-7 ablesbar.



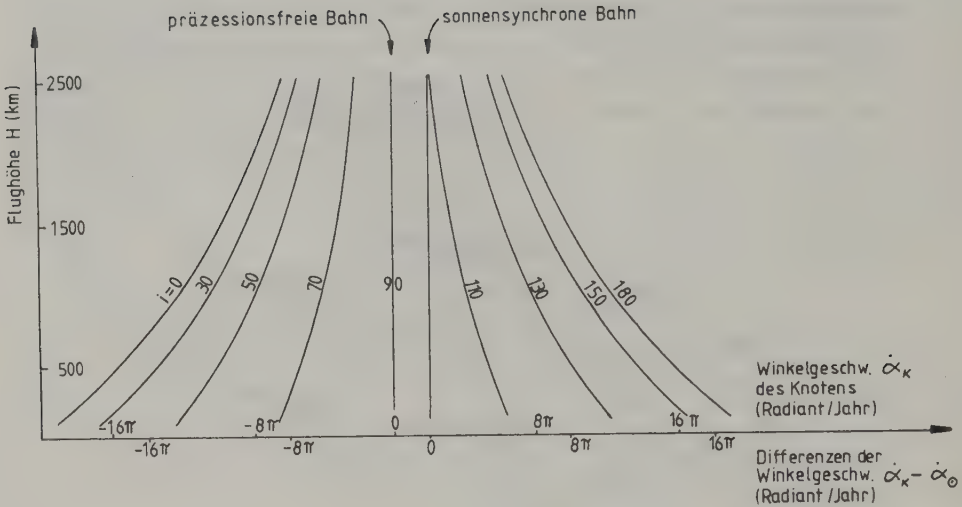


Bild 4.2-7: Präzession der Satellitenbahn in Abhängigkeit von der Flughöhe H und der Inklination i (entnommen aus: Manual of Remote Sensing, 1983)

Man sieht daraus, daß für sonnensynchrone Umlaufbahnen Inklinationen etwas größer als  $90^\circ$  erforderlich sind. Man spricht deshalb von nahezu polaren Bahnen. Bei dem bereits erwähnten LANDSAT beträgt die Flughöhe ca. 920 km. Für diese Flughöhe folgt aus Bild 4.2-7 bzw. aus Gleichung (4.2-12) für die sonnensynchrone Bahn eine Inklination i von  $99.12^\circ$ . Bei den nahezu polaren Bahnen beträgt die größte geographische Breite der Satellitenbahn  $\pm(90^\circ - i)$ , sodaß - abhängig von der Breite des aufgenommenen Streifens - die beiden Polkappen nicht erfaßt werden.

Auch wenn eine Sonnensynchronisation für die Ebene der Satellitenbahn erreicht wird, ist - wie am Bild 4.2-6 abgelesen werden kann - der Sonnenstand nicht für alle Aufnahmen in einem bestimmten Gebiet auf der Erde gleich. Erstens bleibt die Deklination  $\delta_0$  der Sonne unberücksichtigt. Sie erreicht innerhalb einer Jahresperiode  $\pm 23.5^\circ$ , das ist der Winkel  $\epsilon$  im Bild 4.2-6. Aufeinanderfolgende Aufnahmen des gleichen Gebietes mit einer geringen Zeitdifferenz haben daher ähnliche Einstrahlungsverhältnisse; zwischen Sommer und Winter variiert der Sonnenstand aber um  $47^\circ$ .

Der zweite, wesentlich geringere Einfluß auf den Sonnenstand ist die sogenannte Zeitgleichung. Sie definiert die Zeitdifferenz zwischen der tatsächlichen Sonne, die entlang der Ekliptik (Bild 4.2-6) läuft und einer fiktiven Sonne, die mit gleichmäßiger Geschwindigkeit in der Äquatorebene läuft. Die Zeitgleichung erreicht innerhalb einer Halbjahresperiode maximal 16 min.

Schließlich soll zu diesem Thema noch erwähnt werden, daß sich die Satellitenbahnen nicht genau einrichten lassen und permanent auch Bahnstörungen unterliegen. Vielmehr werden in gewissen Zeitabständen die Satelliten beobachtet und mit der voraus berechneten Position verglichen. Bei zu großen Abweichungen, die bei Erderkundungssatelliten aber ohne weiteres 10 km erreichen dürfen, werden Korrekturmanöver durchgeführt. Bei dem erwähnten LANDSAT sind Bahnkorrekturen etwa in Abständen von ca. 1 Monat erforderlich (Manual of Remote Sensing, 1983)

Zum Abschluß soll zusammengefaßt werden, in welcher Reihenfolge die Bahnparameter festgelegt werden:

- a) Die Flughöhe wird vergeben zur Erreichung eines gewünschten Wiederholungszyklus. (Aus der Sicht des Anwenders ist die Festlegung der Flughöhe für das geometrische Auflösungsvermögen von besonderer Wichtigkeit.)
- b) Die Inklination wird vergeben zur Erreichung einer sonnensynchronen Umlaufbahn.
- c) Die Differenz der Rektaszensionen  $\alpha_K - \alpha_0$  wird vergeben, um eine gewünschte Tageszeit für die Aufnahmen zu haben. Für die Strahlungsmessung bevorzugt man  $12^h$  Ortszeit, zum Erkennen geomorphologischer Strukturen (Geologie etc.) ist ein Sonnenstand mit tangentialer Einfallrichtung interessanter.

Zahlenbeispiel: Der bereits angesprochene LANDSAT (4.2.2) überfliegt auf den Bahnhälften von Norden nach Süden (Bild 4.2-4) den Äquator um 9 Uhr 30 Ortszeit. Wie groß ist die Differenz der Rektaszensionen  $\alpha_K - \alpha_0$  ? Würde die Ortszeit 12 Uhr sein, müßte  $\alpha_K - \alpha_0 = \pi$  sein. Für die Ortszeit 9 Uhr 30 beträgt die Differenz der Rektaszension  $\alpha_K - \alpha_0 = 9.5\pi/12$ .

Aufgabe 4.2-1: Wie verändert sich die Laufzeit eines Satelliten, wenn sich seine Flughöhe von 920 km auf 900 km verringert ?

Aufgabe 4.2-2: Sofern in diesem Abschnitt von LANDSAT die Rede war, waren die Satelliten LANDSAT-1, 2 und 3 gemeint (4.2.2). Die Nachfolgesatelliten LANDSAT-4 und 5 (4.2.3) haben andere Bahnparameter, die aus folgenden Angaben zu berechnen sind:

- a) Die Satelliten umkreisen 14.5625mal die Erde am Tag. Wie groß ist die Flughöhe ?
- b) Nach 16 Tagen überfliegen LANDSAT-4, und 5 exakt die gleichen Bahnen. Wieviele Umläufe liegen zwischen identischen Flugbahnen ? Wie sind diese Flugbahnen angeordnet ?
- c) Welche Inklination ist für die sonnensynchrone Umlaufbahn erforderlich ?
- d) LANDSAT-4 und 5 überqueren den Äquator um 9.45 Uhr Ortszeit. Wie groß ist die Differenz der Rektaszension des Knotens und der Rektaszension der Sonne ?

#### 4.2.2 LANDSAT-1, 2 und 3

Die Erderkundungssatelliten LANDSAT-1 (23.7.1972 - 16.1.1978),<sup>1</sup> LANDSAT-2 (22.1.1975 - 5.11.1979, 6.6.1980 - 25.2.1982) und LANDSAT-3 (5.3.1978 - März 1983) haben etwa 1 Million Szenen  $185 \times 185 \text{ km}^2$  aufgenommen. Bei diesem Erderkundungsprogramm der amerikanischen Raumfahrtbehörde (NASA = National Aeronautics and Space Aadministration) wurden ein mechanischer Abtaster (Bild 4.2-8) und eine RBV-Kamera (Bild 4.2-10) eingesetzt. Die Energieversorgung für die unbemannten Satelliten geschah - wie üblich - durch Solarzellen. Weitere technische Details des Multispektralabtasters:

Kanal Nr.	Spektralbereich	Bildelementgröße	Öffnungswinkel $\Delta\alpha$
4	0.50 - 0.60 $\mu\text{m}$	80 m	0.087 mrad
5	0.60 - 0.70 $\mu\text{m}$	80 m	0.087 mrad
6	0.70 - 0.80 $\mu\text{m}$	80 m	0.087 mrad
7	0.80 - 1.1 $\mu\text{m}$	80 m	0.087 mrad
8 <sup>2</sup>	10.4 - 12.6 $\mu\text{m}$	240 m	0.261 mrad

Tab. 4.2-9: Multispektralabtaster in LANDSAT-1, 2 und 3

Für jeden Kanal im sichtbaren und nahen infraroten Spektralbereich sind 6 Detektoren angeordnet, d.h. insgesamt 24 Detektoren. Für die Kanäle 4, 5 und 6 sind Photomultiplier, für den Kanal 7 Photodioden vorhanden. Die Thermalstrahlung wird mittels einer Germaniumoptik auf zwei nebeneinander angeordnete Thermaldetektoren gelenkt. Der Spiegel wippt in einem Bereich von ca. 13 gon, das entspricht bei einer Flughöhe von 920 km einer Streifenbreite von 185 km. Die Abtastfrequenz beträgt  $\nu = 13.61 \text{ Hz}$ ; der Abtaster ist aber nur in einer Richtung aktiv. Mit (3.2-1) ergibt sich somit eine Geschwindigkeit  $V_{\text{Satellit}} = 920 \cdot 13.61 \cdot 6 \cdot 0.000087 = 6.5 \text{ km/s}$  (diese Geschwindigkeit bezieht sich auf die Erdoberfläche; in 920 km Höhe beträgt sie 7.5 km/s). Das Digitalisierungsintervall in einer Zeile beträgt 9.958  $\mu\text{s}$  ( $\hat{=}$  56 m auf der Erdoberfläche), das entspricht einer Impulsfolge von 0.1 MHz (siehe Aufgabe 3.2-3). Da in einer Zeile 3240 Bildpunkte digitalisiert werden, beträgt für 185 km die aktive Abtastzeit 32 ms. Die digitalisierten Bildsignale (64 Stufen  $\hat{=}$  6 Bits) werden entweder direkt oder nach Zwischenspeicherung auf einem Magnetband zu einer Bodenstation übertragen. Die Datenrate während der aktiven Abtastzeit beträgt ca. 15 Mb/s (Mega-Bits je Sekunde).

<sup>1</sup> Bis 13.1.1975 hatte LANDSAT-1 die Bezeichnung ERTS-1 (earth resources technology satellite-1).

<sup>2</sup> Nur bei LANDSAT-3, wobei dieser Kanal aber kurz nach dem Start ausgefallen ist.

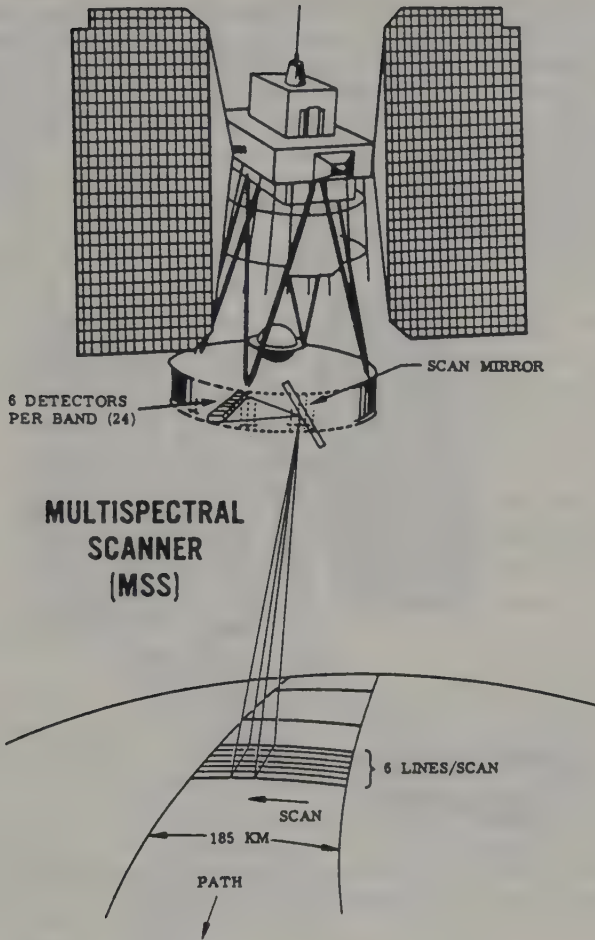


Bild 4.2-8: Multispektralabtaster in LANDSAT-1, 2 und 3  
(Höhe etwa 3 m, Gewicht des gesamten Satelliten-  
systems 950 kg) (NASA-Handbuch)

Anmerkungen zum Signal/Rauschverhältnis: Die Anordnung von 6 Detektoren im Sichtbaren und im nahen Infrarot verbessert das Signal/Rauschverhältnis - aufgrund der am Ende des Abschnittes 3.2.1.5 angestellten Überlegungen - um den Faktor  $\sqrt{6} = 2.4$  gegenüber einem Rotationsabtaster, der nur einen Detektor für einen Spektralbereich besitzt. Außerdem ist wegen der Verwendung eines Wippspiegels anstatt eines rotierenden Spiegels die Bandbreite der von den Detektoren gelieferten elektrischen Signale nicht durch Gleichung (3.2-33) gegeben. Die Bandbreite:  $\Delta f$  ist vielmehr um den Faktor

400 gon/26 gon kleiner, da der Spiegel für die Abtastung einer Zeile nicht eine volle Umdrehung, sondern nur eine Drehung von  $2 \cdot 13$  gon (hin und zurück) zu vollführen hat. Das ergibt eine weitere Verbesserung des Signal/Rauschverhältnisses um den Faktor  $\sqrt{400/26} = 3.9$ . Das Zusammenwirken beider Faktoren ergibt einen Gesamtfaktor von ungefähr  $2.4 \cdot 3.9 = 9.4$ .

Aufgabe 4.2-3: Man wiederhole diese Überlegungen zum Signal/Rauschverhältnis für den Thermalkanal.

Aufgabe 4.2-4: Im Abschnitt 4.2.1 haben wir kennengelernt, daß LANDSAT-1, 2 und 3 am Tag die Erde 13.94mal umkreisen. Man verifiziere mit dieser Angabe, daß die Geschwindigkeit  $V_{\text{Satellit}} = 6.5$  km/s beträgt.

Aufgabe 4.2-5: Man überprüfe, ob die Datenrate tatsächlich ca. 15 Mb/s beträgt.

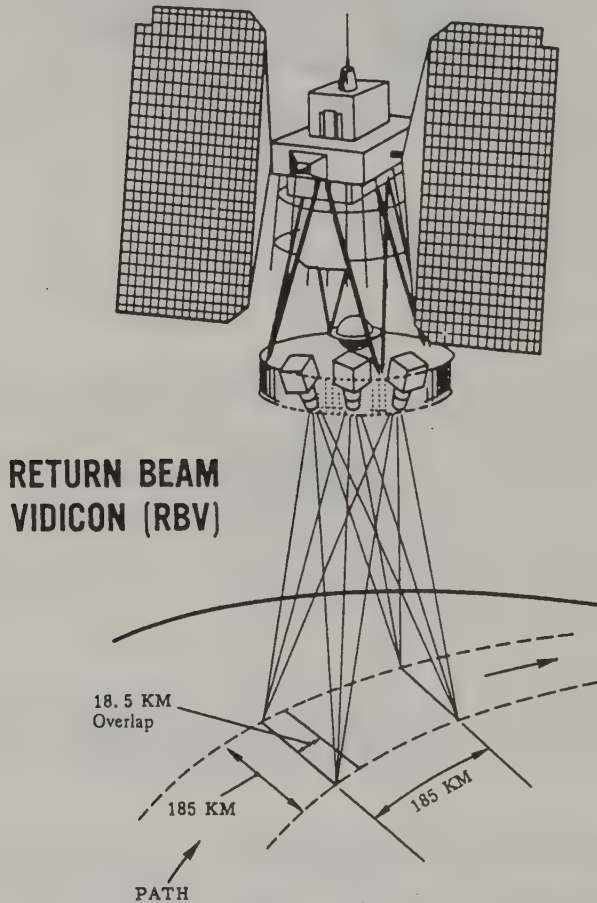


Bild 4.2-10: RBV-Kameras in LANDSAT-1 und 2 (NASA-Handbuch)



Bei LANDSAT-1 und 2 waren drei RBV-Kameras (siehe Abschnitt 3.3) für die drei Spektralbereiche 0.475 - 0.575, 0.580 - 0.680 und 0.698 - 0.830  $\mu\text{m}$  an Bord. Die Bildelementgröße beträgt 80 m; eine Szene deckt 185x185  $\text{km}^2$ . Die Ausbeute an Bildern bei LANDSAT-1 und 2 war sehr bescheiden.<sup>1</sup> Das RBV-Kamerasystem bei LANDSAT-3 hat dagegen eine beachtliche Anzahl von Bildern gebracht. Es waren zwei Kameras nebeneinander montiert, jeweils mit einem Bildformat 98x98  $\text{km}^2$ . (Vier solche Bilder decken eine MSS-Szene von 185x185  $\text{km}^2$ .) Die Kameras bei LANDSAT-3 waren nur für den Spektralbereich 0.505 - 0.750  $\mu\text{m}$  ausgelegt und hatten eine Bildelementgröße von 40 m. Die Übertragung der Bildsignale geschah in analoger Form.

Der Einzugsbereich der einzelnen Datenempfangsstationen für die Multispektralabtaster und die RBV-Kameras der LANDSAT-Satelliten ist auf dem Bild 4.2-11 ersichtlich. Außerhalb der von den Bodenstationen erfaßbaren Gebiete werden die Daten zunächst auf Magnetband im Satelliten gespeichert. Kommt dann der Satellit in den Einzugsbereich einer amerikanischen Empfangsstation, wird das Magnetband abgespielt und die Daten werden zur Bodenstation übertragen. Die amerikanischen Empfangsstationen sind über einen eigenen Kommunikationssatelliten DOMSAT zusammengeschlossen. Die zentrale Verteilungsstelle für alle Daten war bisher das EROS-Data-Center ( $\hat{=}$  Earth Research Observation Systems) in Sioux Falls, South Dakota. Seit 1984 hat die Privatfirma EOSAT ( $\hat{=}$  Earth Observation Satellite, siehe auch 4.2.11b) den Vertrieb übernommen.

Diese Zentralstelle hat Rechte an die anderen Empfangsstationen abgegeben. So sind die nichtamerikanischen Empfangsstationen in der Bearbeitung der empfangenen Bilder und im Vertrieb dieser Produkte im wesentlichen autonom. Unter dem Namen EARTHNET wurde von der Europäischen Weltraumbehörde ESA (4.2.11) eine Vertriebsorganisation gegründet. Von den aufgenommenen Szenen, diese entsprechen übrigens nur einem Bruchteil der aufnehmbaren Szenen, kann man von den Verteilerorganisationen kleinformatige Schwarzweißbilder (Quick-looks) zur Beurteilung der Wolkenbedeckung etc. anfordern. Vorbestellungen wickelt man am besten direkt mit den Empfangsstationen ab, für Mitteleuropa entweder Fucino (Italien) oder Kiruna (Schweden) (Bild 4.2-11).

<sup>1</sup> Während der Vorbereitung der Satellitenmission hatte man übrigens auf diesen Sensor größere Hoffnungen hinsichtlich vieler Aufnahmen als auf den Multispektralabtaster gesetzt.



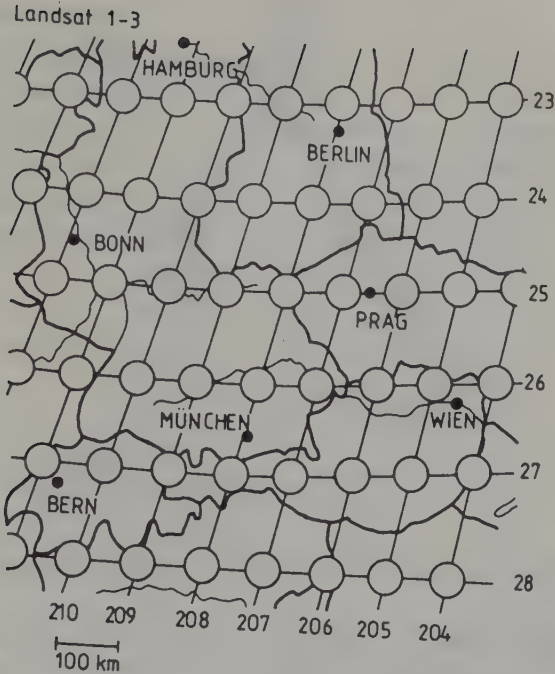


Bild 4.2-12: Bildmittelpunkte der Szenen des Multispektralabtasters von LANDSAT-1, 2 und 3

Infolge der nahezu polaren Bahn nimmt die Überdeckung der benachbarten Streifen vom Äquator, wo sie 14% beträgt, nach Norden zu. In der geographischen Breite  $\phi = 50^\circ$  beträgt die Querüberdeckung bereits 44.8%. Der überlappende Bereich kann übrigens stereoskopisch betrachtet werden. (Das für die Stereoskopie charakteristische Basis/Höhenverhältnis beträgt aber nur 1:9, woraus sich der "Überhöhungsfaktor"  $u_z$  mit nur 0.7 (siehe Abschnitt 5.1.3)) ergibt. Infolge der nahezu polaren Bahn nimmt auch der Winkel  $\alpha$ , den die Satellitenbahn mit den Meridianen einschließt, vom Äquator nach Norden zu. Aus dem rechtwinkligen sphärischen Dreieck des Bildes 4.2-13 kann die gesuchte Beziehung abgelesen werden:

$$\sin \alpha = \frac{-\cos i}{\cos \phi} \quad (4.2-13)$$

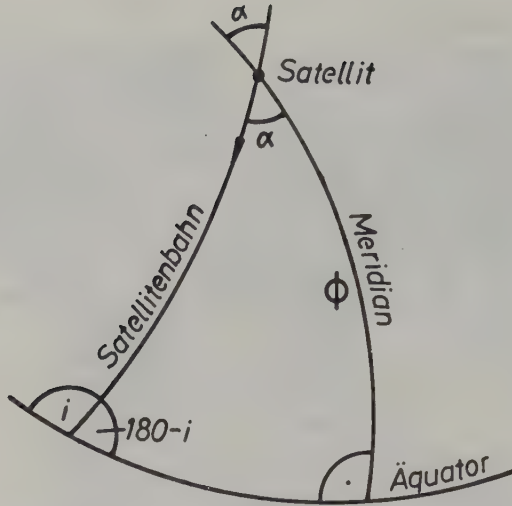


Bild 4.2-13: Winkel zwischen Satellitenbahn und Meridian

Zahlenbeispiel: Die Bahn von LANDSAT-1, 2 und 3 hat gemäß Abschnitt 4.2.1 eine Inklination  $i = 99.12^\circ$ . Der Winkel  $\alpha$  beträgt für eine geographische Breite  $\phi = 48^\circ$  (etwa München und Wien):

$$\sin \alpha = - (-0.1585) / 0.6691 \rightarrow \alpha = 13.7^\circ$$

Im Abschnitt 4.2.1 wurde auch erläutert, daß LANDSAT für die Erfassung der ganzen Erdoberfläche 251 Umläufe, verteilt auf 18 Tage, benötigt. LANDSAT-3 war gegenüber LANDSAT-2 um 9 Tage versetzt, sodaß ein Wiederholungszyklus von 9 Tagen während der aktiven Zeit beider Satelliten gewährleistet war.

Die LANDSAT-Aufnahmen haben in der Öffentlichkeit eine große Popularität erreicht. Es gibt auch sehr gelungene Bildinterpretationen, z.B. der Diercke Weltraum-Atlas (1981). Obwohl LANDSAT-1, 2 und 3 keine Aufnahmen mehr liefern, werden ihre Bilder, die flächendeckend seit Anfang der 70er Jahre vorhanden sind, für viele aktuelle Problemstellungen als interessante Referenzdaten dienen.

Aufgabe 4.2-6: Die Inklination  $i = 99.12^\circ$  wurde im Abschnitt 4.2.1 für eine Flughöhe von 920 km des LANDSAT ermittelt. Wie mußte die Inklination für eine sonnensynchrone Umlaufbahn gewählt werden, wenn die Flughöhe auf 890 km sinkt? Wie groß ist dann der Winkel der Satellitenbahn mit dem Meridian in einer geographischen Breite von  $48^\circ$ ?

#### 4.2.3 LANDSAT-4 und 5

Diese Erderkundungssatelliten (Start LANDSAT-4 am 16.7.1982, Start LANDSAT-5 am 1.3.1984) haben den bei LANDSAT-1, 2 und 3 bewährten Multispektralabtaster (MSS), allerdings ohne Thermalkanal<sup>1</sup>, und zusätzlich einen neu konzipierten (Rotations-)Abtaster, den sog. Thematic Mapper (TM)<sup>2</sup>, an Bord. Die wichtigsten technischen Daten, einschließlich der rauschäquivalenten Reflexionsgradänderung  $NE\Delta\rho$  bzw. der rauschäquivalenten Temperaturänderung  $NE\Delta T$  (3.2.1.5), des TM lauten:

Kanal Nr.	Spektralbereich	$NE\Delta\rho$ $NE\Delta T$	Bildelementgröße	Öffnungswinkel $\Delta\alpha$
1	0.45 - 0.52 $\mu\text{m}$	0.8 %	30 m	0.0425 mrad
2	0.52 - 0.60 $\mu\text{m}$	0.5 %	30 m	0.0425 mrad
3	0.63 - 0.69 $\mu\text{m}$	0.5 %	30 m	0.0425 mrad
4	0.76 - 0.90 $\mu\text{m}$	0.5 %	30 m	0.0425 mrad
5	1.55 - 1.75 $\mu\text{m}$	1.0 %	30 m	0.0425 mrad
6	10.40 - 12.50 $\mu\text{m}$	0.5 °C	120 m	0.1700 mrad
7	2.08 - 2.35 $\mu\text{m}$	2.4 %	30 m	0.0425 mrad

Tab. 4.2-14: Charakteristika des Thematic Mapper in LANDSAT-4 und 5

Zuerst soll die wesentlich bessere geometrische Auflösung der TM-Aufnahmen im Vergleich zu den MSS-Aufnahmen hervorgehoben werden (Bild 4.2-15). Der Betrachter hat den Eindruck, daß die Brillanz nicht um das 2.7-fache ( $\hat{=} 80/30$ ) sondern um das 7-fache ( $\hat{=} 80^2/30^2$ ) besser geworden ist.

Außerdem wurde die spektrale Auflösung, d.h. die Bereiche der einzelnen Kanäle wurden schmaler, etwas verbessert und vor allem wurden zusätzliche Spektralbereiche erschlossen. Dadurch hat man wesentlich bessere Voraussetzungen zur Trennung der verschiedenen Objekte. Im Kanal 4 haben z.B. Sand und Schnee sowie noch zusätzlich die Wolken die gleichen reflektierten Strahlungswerte. Im Kanal 5 kann man Sand und Schnee bereits gut voneinander trennen; Wolken und Sand sind aber noch nicht unterscheidbar. Erst der Kanal 6 erlaubt auch diese Trennung (Manual of Remote Sensing, 1983,

<sup>1</sup> Die Kanäle 4,5,6,7 (Tab. 4.2-9) wurden bei LANDSAT-4 und 5 in 1,2,3,4 umnummeriert.

<sup>2</sup> Der TM war bei LANDSAT-4 nur etwa die ersten 2 Jahre nach dem Start in Betrieb. Er wurde aber im Oktober 1987 wieder aktiviert (unter Einstellung des MSS-Betriebes), um LANDSAT-5 zu entlasten und um die Lebensdauer beider Satelliten zu verlängern.





Bild 4.2-15: MSS-Aufnahme (links) mit 80 m Bildelementgröße und  
TM-Aufnahme (rechts) mit 30 m Bildelementgröße im  
Spektralbereich 0.6 - 0.7  $\mu\text{m}$  (LANDSAT User Notes)

S.564). Der Kanal 7 ist für hydrologische Problemstellungen von besonderem Interesse.

Der Kanal 6, der Thermalkanal, hat eine ganz besondere Bedeutung, obwohl seine geometrische Auflösung wesentlich schlechter ist als die der übrigen Kanäle. Die Kalibrierung erfolgt mit schwarzen Körpern, die auf einer bekannten Temperatur gehalten werden, und mit der bekannten Himmelsstrahlung. Bild 4.2-16 zeigt ein TM-Thermalbild von Wien, aufgenommen am 5.6.1985. Die Codierung läuft von schwarz (kalt) zu weiß (warm). Man sieht sehr gut den kühlenden Einfluß des Wienerwaldes. Die höchsten Temperaturen treten im dichtverbauten Stadtgebiet sowie in den Industrievierteln südlich und nördlich von Wien auf. (Die absolute Kalibrierung der TM-Aufnahmen im Sichtbaren und nahen Infrarot wird im Abschnitt 6.5.1 besprochen.)

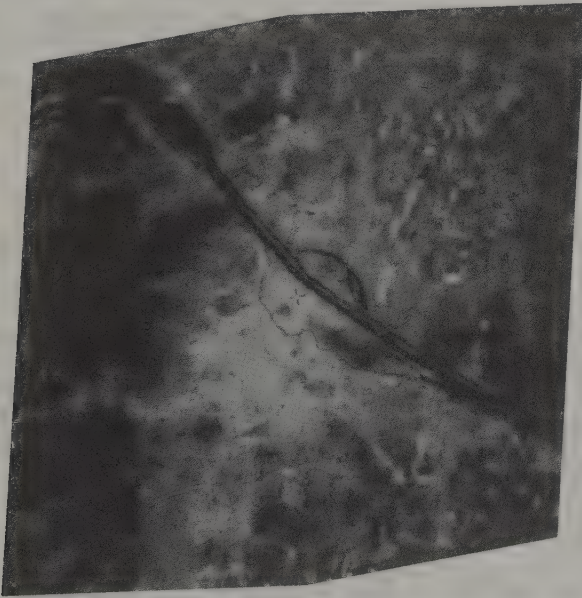


Bild 4.2-16: TM-Thermalbild von Wien (exakter Maßstab im Original 1:200000; nach Norden orientiert; geometrisch rektifiziert von Jansa, 1987)

LANDSAT-4 wiegt 1996 kg im Vergleich zum 950 kg schweren LANDSAT-3. LANDSAT-4 und 5 umkreisen am Tag 14.5625mal die Erde. Daraus folgt mit (4.2-7) eine Flughöhe von 713 km. Die 185 km breiten Aufnahmestreifen sind so angeordnet, daß innerhalb von 16 Tagen jeder Punkt der Erdoberfläche erfaßt werden kann. Aus (4.2-11) folgt, daß die Satelliten nach 233 Umläufen auf die gleiche Bahn kommen. Die zeitlich benachbarten Bahnen haben am Äquator einen Abstand von  $40076/14.5625 = 2752$  km. Die örtlich benachbarten Bahnen haben am Äquator einen Abstand von  $40076/233 = 172$  km. Im Gegensatz zu LANDSAT-1, 2 und 3 sind bei LANDSAT-4 und 5 die Satellitenbahnen des zweiten Tages nicht den Bahnen des ersten Tages örtlich benachbart. Die 1. Bahn des zweiten Tages, also die 15. Bahn, liegt vielmehr etwa in der Mitte zwischen der ersten und zweiten Bahn des ersten Tages. Das Bild 4.2-17 veranschaulicht diese Situation für die ersten 2752 km entlang des Äquators. (Die 1. Bahn am ersten Tag wurde als Nullpunkt gewählt.) Rechnerisch ergibt sich z.B. die Position der 15. Bahn wie folgt:  $15 \cdot 2752 - 40076 = 1204$  km. Für die sonnensynchrone Umlaufbahn ist gemäß (4.2-12) eine Inklination von  $98.24^\circ$  erforderlich. Die Überquerung des Äquators geschieht um 9.45 Uhr Ortszeit.

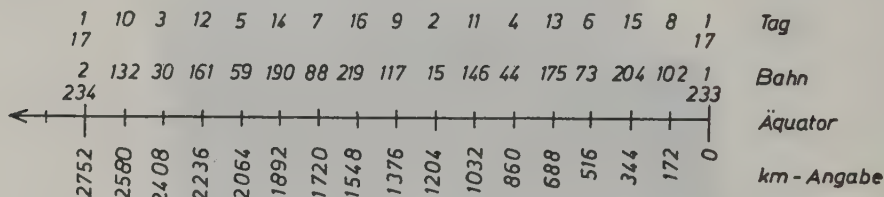


Bild 4.2-17: Umlaufbahnen von LANDSAT-4 und 5 im Intervall von 0 bis 2752 km am Äquator

Die Abtastfrequenz  $\nu$  beträgt beim TM 6.999 Hz. Diese geringe Abtastfrequenz ist möglich, weil für jeden Spektralbereich 16 (Kanal 1 bis 5 und 7) bzw. 4 (Kanal 6) benachbarte Detektoren (ausschließlich Festkörperdetektoren) angeordnet sind. Der Spiegel wippt im Bereich von  $16.5$  gon, allerdings ist beim TM der Sensor in beiden Abtastrichtungen aktiv (Bild 4.2-18). Um trotzdem parallele Zeilen zu bekommen, muß am Ende einer abgetasteten Zeile durch einen im Abtaster eingebauten Mechanismus eine Zeilenversetzung um die Zeilenbreite  $480$  m ( $= 16 \times 30$ ) auf der Erdoberfläche geschehen. Das Digitalisierungsintervall in einer Zeile beträgt  $9.611 \mu s$  ( $= 30$  m auf der Erdoberfläche). Die ca.  $6120$  Bildelemente in einer Zeile werden bei den hochauflösenden Kanälen in  $59$  ms aufgenommen, das entspricht einer Abtastgeschwindigkeit auf der Erde von  $3.12$  m/ $\mu s$ . Ein Bildelement wird mit  $8$  Bits =  $1$  Byte, das entspricht  $256$  Stufen, dargestellt. (Bei LANDSAT-1, 2 und 3 hatte die radiometrische Auflösung nur  $64$  Stufen.) Daraus ergibt sich eine Datenübertragungsrate von  $85$  Mega-Bits/s ( $\approx 8$  Bits  $\cdot$  ( $16$  Detektoren  $\cdot$   $6$  Kanälen  $+ 4$  Detektoren)  $\cdot 10^6/9.611$ ). Die Übertragung dieser hohen Datenmenge kann nicht mehr im S-Band wie bei LANDSAT-1, 2 und 3, sondern muß im aufwendigeren X-Band erfolgen (Bild 2.2-2).

Anmerkungen zum Signal/Rauschverhältnis: Die Verkleinerung des Öffnungswinkels  $\Delta\alpha$  um den Faktor  $0.087/0.0425 = 2$  bringt laut Gleichung (3.2-37) eine Verschlechterung des Signal/Rauschverhältnisses um den Faktor 4 gegenüber LANDSAT-1, 2 und 3. Andererseits bringt die Anordnung von 16 Detektoren im sichtbaren und nahen Infrarot eine Verbesserung des Signal/Rauschverhältnisses - aufgrund der am Ende des Abschnittes 3.2.1.5 angestellten Überlegungen - um den Faktor  $\sqrt{16} = 4$  gegenüber einem Rotationsabtaster, der nur einen Detektor für einen Spektralbereich besitzt. (Bei LANDSAT-1, 2 und 3 war dieser Faktor nur 2.7.) Da der Wippspiegel in beiden Richtungen aktiv ist, konnte trotz des kleinen Öffnungswinkels beim TM die Bandbreite  $\Delta f$  des Signals verhältnismäßig klein gehalten werden. Sie beträgt nämlich (Gleichungen (3.2-21) und (3.2-25)):  $\Delta f = 1/(2 \cdot 9.611) = 52 \text{ kHz}$  (Vergleichswert bei LANDSAT-1, 2 und 3: 35.2 kHz).

Aufgabe 4.2-7: Man wiederhole diese Überlegungen zum Signal/Rauschverhältnis für den Thermalkanal.

Aufgabe 4.2-8: Man berechne die Geschwindigkeit von LANDSAT-4 und 5, und zwar einmal aus der Umlaufzeit der Satelliten und einmal unter Verwendung der Beziehung (3.2-1). Ergebnis: 6.7 km/s

Aufgabe 4.2-9: Man überprüfe, inwieweit bei LANDSAT-4 und 5 das Abtasttheorem eingehalten wurde.

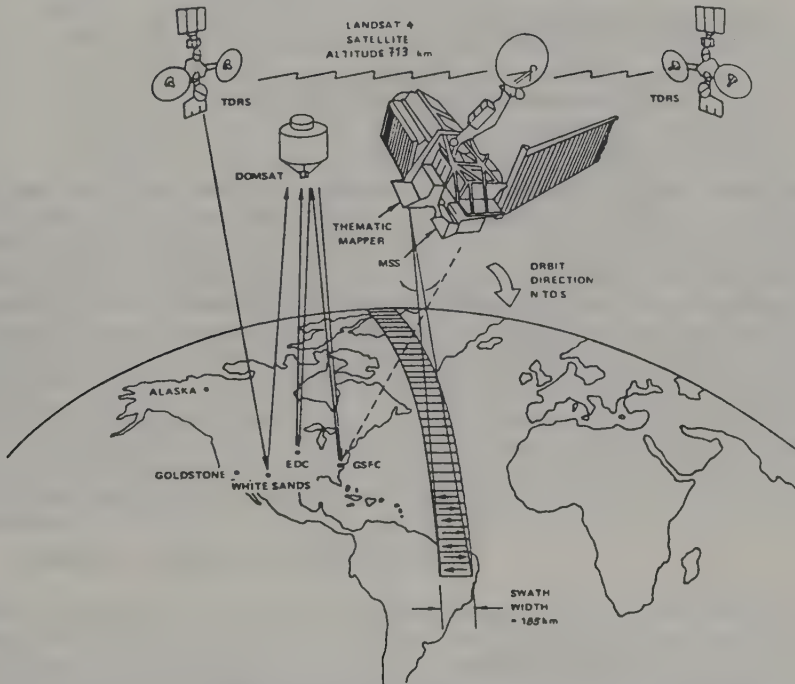


Bild 4.2-18: LANDSAT-4 mit den Kommunikationssatelliten TDRS  
(Manual of Remote Sensing, 1983)



Bei LANDSAT-4 und 5 ist keine Magnetbandzwischen­speicherung an Bord des Satelliten vorhanden. Statt dessen sind zwei - etwa diametral gegenüberliegende - geostationäre Nachrichtensatelliten (TDRS = tracking and data relay satellite) über dem Äquator positioniert, die die Signale von LANDSAT-4 und 5 zu den amerikanischen Bodenstationen weiterleiten können. Abgesehen von einem kleinen Segment bei etwa  $80^{\circ}$  ö.L. können mit diesem Kommunikationssystem sehr rasch die Bilder vom gesamten Erdball empfangen werden. Nicht unerwähnt soll bleiben, daß es mit dem Betrieb der beiden Nachrichtensatelliten erhebliche Probleme gibt.) Zusätzlich sind die amerikanischen Bodenstationen noch über den Kommunikationssatelliten DOMSAT zusammengeschlossen (Bild 4.2-18). Die außeramerikanischen Bodenstationen, die im Bild 4.2-11 angegeben sind, können innerhalb ihres Einzugsbereiches die Bilder direkt empfangen.

Aufgabe 4.2-10: Im Bild 4.2-11 sind die Einzugsbereiche für TM-Aufnahmen für die einzelnen Bodenstationen strichliert angegeben. Warum sind diese Einzugsbereiche kleiner als bei LANDSAT-1, 2 und 3 ?

Vom TM werden u.a. folgende Produkte angeboten (unter den im Abschnitt 4.2.2 erläuterten Verfahrensregeln):

CCT einer Szene $185 \times 185 \text{ km}^2$	7.800 DM
CCT einer Viertel-Szene $97 \times 97 \text{ km}^2$	3.500 DM
Filmdia ca. 1:750000 einer Szene	
$185 \times 185 \text{ km}^2$ für einen Spektralbereich in S/W	900 DM
Filmdia ca. 1:400000 einer Viertel-Szene	
$97 \times 97 \text{ km}^2$ für einen Spektralbereich in S/W	300 DM
Filmdia ca. 1:750000 einer Szene	
$185 \times 185 \text{ km}^2$ als Farbkomposition	3.000 DM

Eine ganze TM-Szene besteht für einen hochauflösenden Kanal aus 5984 Zeilen, die in  $5984/(16 \cdot 6.999 \cdot 2) = 27 \text{ s}$  aufgenommen werden. Der Einfluß der Erdrotation auf das Bildformat, der Winkel zwischen den Satellitenbahnen und den Meridianen sowie die Abnahme der Querüberdeckung vom Äquator nach Norden sind bei LANDSAT-4 und 5 etwa so wie bei LANDSAT-1, 2 und 3 (siehe Abschnitt 4.2.2). Der Zeilenindex stimmt mit LANDSAT-1, 2 und 3 überein; der Spaltenindex ist infolge der geänderten Satellitenbahnen von LANDSAT-1, 2 und 3 abweichend (Vergleich der Bilder 4.2-12 und 4.2-19). Die Präzision der Navigation ist bei LANDSAT-4 und 5 wesentlich besser als bei LANDSAT-1, 2 und 3.



## LANDSAT 4+5

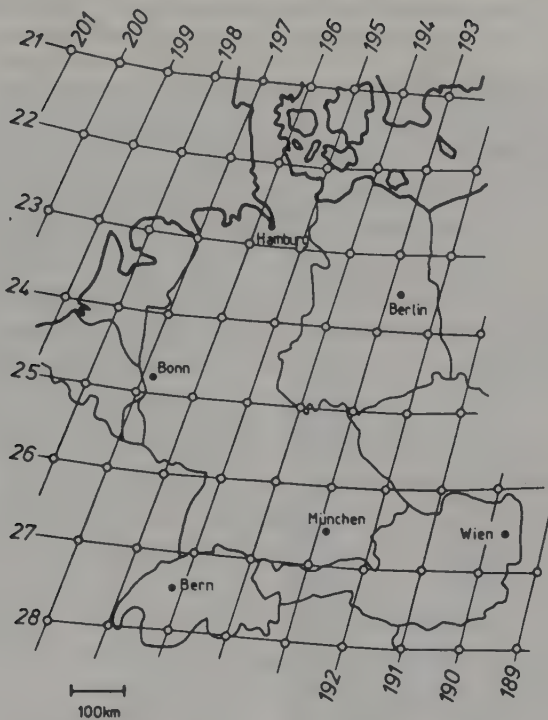


Bild 4.2-19: Bildmittelpunkte der Szenen des TM von LANDSAT-4 und 5

Für die digitale Bildverarbeitung von Interesse ist der Datenumfang einer TM-Szene, der auf Massenspeichern unterzubringen ist. Die korrigierte Szene (korrigiert insbesondere im Hinblick auf Panoramaverzerrung (6.4.2.1), Erdkrümmung und Erdrotation (6.4.3)) bestehen aus 5965 Zeilen, wobei jede Zeile 6967 Bildelemente besitzt. Die Elemente des Kanals 6 werden in beiden Richtungen vervierfacht. Eine TM-Szene auf einem CCT hat deshalb folgende Datenmenge:

$$7 \text{ (Kanäle)} \cdot 5965 \cdot 6967 \approx 291 \text{ Megabytes}$$

LANDSAT-4 und 5 mit TM ist für die Fernerkundung z.Z. das attraktivste Aufnahmesystem. Es ist deshalb nicht überraschend, daß dieses Programm von den Amerikanern fortgesetzt wird. Für 1989 ist LANDSAT-6 geplant; es wird vermutlich zusätzlich zu den bisherigen Kanälen einen sogenannten panchromatischen Kanal geben, also eine große Bandbreite, dafür aber eine Bildelementgröße von 15 m. LANDSAT-7 ist für 1993 geplant. Dabei ist an eine Aufteilung des Thermalbereiches in vier Bänder mit einer Bildelementgröße von 60 m gedacht. LANDSAT-6 und 7 sollen wieder - wie LANDSAT-1, 2 und 3 - eine Magnetbandaufzeichnung für die Zwischenspeicherung der Daten im Satelliten bekommen.

Aufgabe 4.2-11: Man berechne für TM-Aufnahmen in der geographischen Breite von  $48^\circ$  den Winkel zwischen den Satellitenbahnen und den Meridianen.

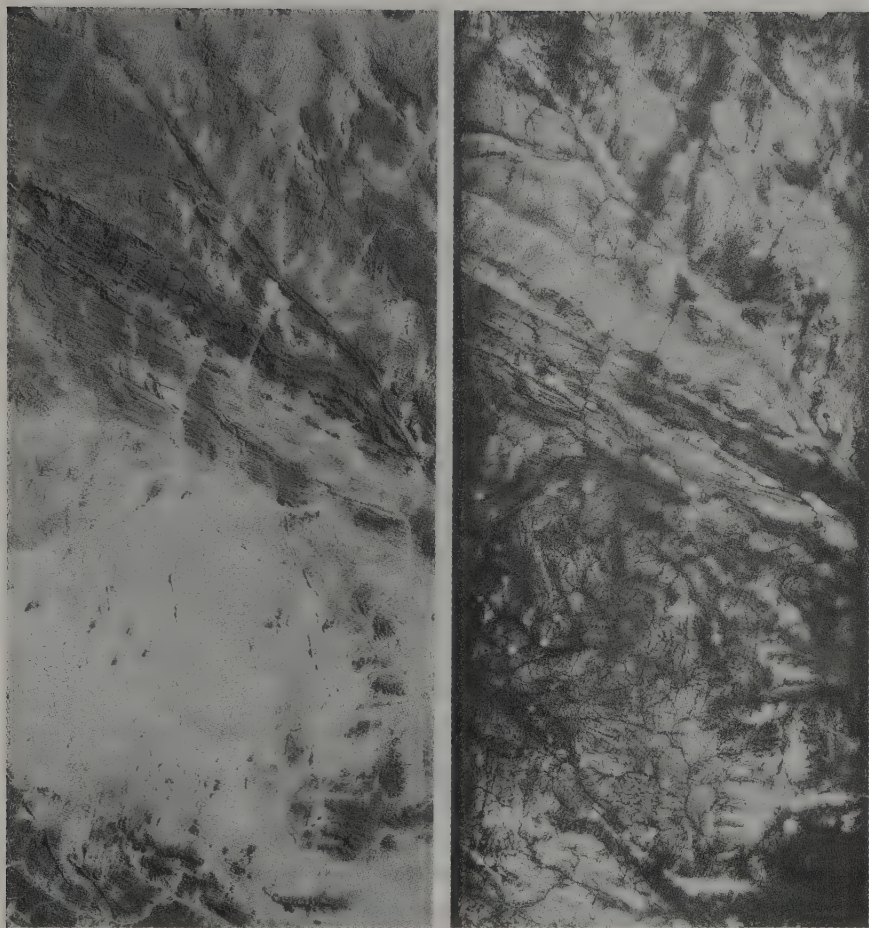
Aufgabe 4.2-12: Für eine TM-Aufnahme ist das geometrische Auflösungsvermögen (lp/mm) in Streifenmitte und am Streifenrand zu berechnen, und zwar sowohl in Flugrichtung als auch quer dazu.

#### 4.2.4 SEASAT und Shuttle Imaging RADAR (SIR)

Als Gegenstück zu LANDSAT wurde vor allem für ozeanographische Forschungen der Satellit SEASAT entwickelt, der kurz nach seinem Start (26.6.1978) am 10.10.1978 wegen eines technischen Gebrechens ausfiel. Er hatte neben drei anderen Sensoren auch ein nichtabbildendes Radiometer, das nur entlang der Satellitenbahn im Spektralbereich  $0.47 - 0.94 \mu\text{m}$  (Bildelementgröße 2 km) und im Spektralbereich  $10.5 - 12.5 \mu\text{m}$  (Bildelementgröße 4 km) aufnahm, und ein SAR-Gerät (3.4.3.2), das auf der Wellenlänge 23.5 cm (L-Band) operierte und dessen Aufnahmen eine Bildelementgröße von 25 m aufweisen.

Ein dem SEASAT-Radar ähnliches SAR wurde in zwei Experimenten auch vom amerikanischen Space Shuttle aus eingesetzt (shuttle imaging radar, SIR): SIR-A (1981) nahm Radarbilder mit 40 m Bildelementgröße bei einer Streifenbreite von 56 km auf. Bei SIR-B (1984) war der Depressionswinkel (siehe Abschnitt 3.4.3.1) wählbar, sodaß aus unterschiedlichen Aufnahmen desselben Gebietes sogenannte "Multi-Depressionswinkel-Bilder" mit entsprechend höherem Informationsgehalt hergestellt werden konnten.

Von solchen Radar-Aufnahmen gibt es - auch außerhalb der Ozeane - sehr attraktive Bilder. Den interessanten Informationsgehalt kann man aus der folgenden bildhaften Gegenüberstellung ermessen (Bild 4.2-20): Oben ist eine photographische Aufnahme mit der Zeiss-Reihenmeßkamera RMK 30/23 wiedergegeben, die mit dem Spacelab (4.2.8) aufgenommen wurde. Unten ist die SAR-Aufnahme vom gleichen Gebiet wiedergegeben, die den trockenen Sand durchdringt und die Strukturierung der Felsformationen zeigt. Diese SAR-Aufnahme stammt nicht vom SEASAT, aber vom Radar SIR-A (shuttle imaging radar, Erste Mission), das im wesentlichen dem SAR-Gerät im SEASAT entsprach.



**Bild 4.2-20:** Gegenüberstellung einer photographischen Aufnahme (links) und einer SAR-Aufnahme (rechts) von einer Wüste im Süden Algeriens (entnommen aus dem ESA-Report SP-1073, 1985)

#### 4.2.5 Heat Capacity Mapping Mission (HCMM)

In Fortsetzung unseres Überblicks über die erderkundenden Satelliten, der in erster Linie historisch gegliedert ist, kommen wir nun zur Heat Capacity Mapping Mission. HCMM wurde am 26.4.1978 gestartet und hatte eine Lebensdauer bis September 1980. In dieser Zeitspanne wurden verhältnismäßig viele Thermalbilder mit dem an Bord befindlichen Heat Capacity Mapping Radiometer (HCMR), einem Rotationsabtaster, aufgenommen. Da die HCMM-Aufnahmen ein sehr wertvolles Material sind und vom NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, sowie von der ESA (4.2.11) mit ihren Verkaufsstellen noch vertrieben werden, ist eine kurze Beschreibung der technischen Details angebracht.

Spektralbereiche	10.5 - 12.5 $\mu\text{m}$	0.55 - 1.1 $\mu\text{m}$
Temperatur- bzw. radio-		
metrische Auflösung	0.4 $^{\circ}\text{C}$	0.02 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$
Meßbereich	260 - 340 K	0 - 100 % Albedo
Öffnungswinkel		0.83 mrad
Bildelementgröße		0.5 - 1.0 km
(Flughöhe = 620 km)		
Breite der erfaßten		
Geländestreifen	716 km	
Abtastfrequenz	14 Hz	

Die Umlaufbahn war so eingerichtet, daß der Satellit um 2 Uhr Ortszeit den Äquator von Norden nach Süden und um 14 Uhr von Süden nach Norden überflog. Die Daten wurden direkt zu den NASA-Empfangsstationen übertragen.

Aus den digitalen Bilddaten, die mit 8 Bits auf CCT aufgezeichnet sind, wurden und werden vor allem großräumige Thermalkartierungen hergestellt. (Ein CCT kostet 355,-- DM.) Beispielgebend sind Kartierungen für die Umweltforschung (Goßmann, 1984) und für Klimafunktionskarten im Ruhrgebiet (Stock, 1981).

#### 4.2.6 Satelliten für die Meteorologie

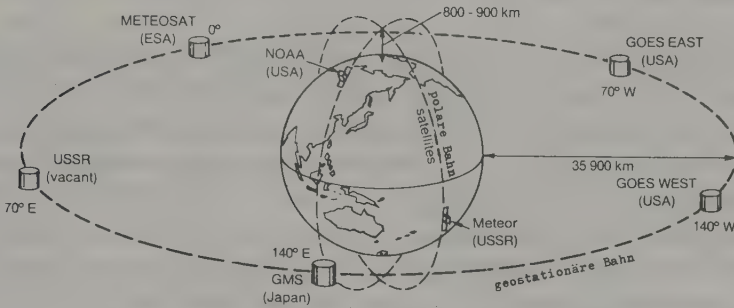
Für die Beobachtung der Atmosphäre werden eigene Satelliten eingesetzt. Dabei geht es weniger um eine gute geometrische Auflösung, sondern um eine globale Beobachtung der Atmosphäre in kurzen Zeitabständen. Am bekanntesten ist der Wettersatellit METEOSAT. Wie das Bild 4.2-21 zeigt, ist der METEOSAT aber nur einer der fünf Satelliten für eine permanente Überwachung des Wettergeschehens. Diese fünf Satelliten sind in der Äquatorebene in einer geostationären Position angeordnet, d.h. die Flughöhe beträgt 35900 km (4.2.1).

Die Bereiche, die vom jeweiligen Satelliten beobachtet werden können, sind im Bild 4.2-22 festgehalten. Man sieht daraus, daß mit den geostationären Satelliten die Erdkugel nur innerhalb des Streifens von etwa  $\pm 79^{\circ}$  geographischer Breite beobachtet werden kann und nur innerhalb des Streifens von

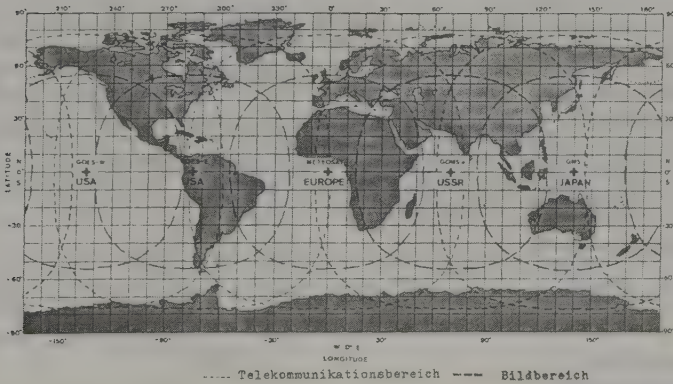


etwa  $\pm 52^\circ$  akzeptable Bilder empfangen werden können. Aus diesem Grund sind noch zusätzliche Satelliten in einer polaren Bahn erforderlich (Bild 4.2-21).

**Aufgabe 4.2-13:** Man verifiziere die Aussage, daß von METEOSAT im günstigsten Fall die Gebiete  $\pm 79^\circ$  geographischer Breite erfaßt werden können.



**Bild 4.2-21: Das globale Wetterbeobachtungssystem**



**Bild 4.2-22: Von den geostationären Satelliten kontrollierte Bereiche**

METEOSAT-1, der von der europäischen Weltraumbehörde ESA betrieben wird, wurde am 23.11.1977 gestartet. Zur Zeit stammen die Aufnahmen vor allem von METEOSAT-2 (Start Juni 1981; das METEOSAT-Programm bis zum Jahr 2000 wird im Abschnitt 4.2.11 erläutert). Der METEOSAT hat u.a. einen Rotationsabtastrer an Bord. Die technischen Daten des Rotationsabtastrers, der wegen der geostationären Position einen zusätzlichen Mechanismus für die Versetzung der Zeilen quer zur Abtastrichtung benötigt, sind in der folgenden Tabelle



zusammengefaßt:

Spektralbereiche	0.4 - 1.1 $\mu\text{m}$ 5.7 - 7.1 $\mu\text{m}$ 10.5 - 12.5 $\mu\text{m}$
Öffnungswinkel	0.064 mrad
Bildelementgröße	2.3 - 4 km
Anzahl der Bildelemente in einer Zeile	5000

Der Spektralbereich 5.7 - 7.1  $\mu\text{m}$  ist besonders für den Feuchtigkeitsgehalt der Atmosphäre sensibel (helle Gebiete haben eine hohe Wasserdampfkonzentration). Der Thermalbereich erlaubt die Ermittlung der Temperatur der Wolken und damit indirekt auch ihre höhenmäßige Verteilung. METEOSAT übermittelt seine Bilder in Zeitabständen von 30 min zu den Bodenempfangsstationen, sodaß über die Wolkenbewegung auch auf die Windgeschwindigkeit geschlossen werden kann. METEOSAT-Bilder haben auch eine gewisse Bedeutung für die großräumige Erfassung der Temperatur der Ozeane und z.B. auch für die Überwachung großräumiger Waldbrände. (Ein CCT kostet 204,-- DM.)

Die zusätzlichen Satelliten in der niedrigeren, polaren Bahn werden von der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) der USA betrieben. Diese Satelliten trugen zuerst den Namen TIROS; später die Bezeichnung NOAA-Satelliten. Zur Zeit sind zwei NOAA-Satelliten im Umlauf, die einen Rotationsabtaster mit der Bezeichnung AVHRR (= advanced very high resolution radiometer) an Bord haben. Die Bahn ist sonnensynchron und deshalb nicht exakt polar. Jeder Punkt der Erdoberfläche kann in 12-Stundenintervallen von einem der beiden Satelliten (one-day repeaters, 4.2.1) erfaßt werden, da die Bahnen der beiden Satelliten um 12 Stunden gegeneinander versetzt sind. Weitere technische Daten:

Spektralbereiche	0.55 - 0.7 $\mu\text{m}$ 0.7 - 1.1 $\mu\text{m}$ 3.5 - 3.9 $\mu\text{m}$ 10.3 - 11.3 $\mu\text{m}$ 11.5 - 12.5 $\mu\text{m}$ (nur NOAA-9)
Öffnungswinkel	1.3 mrad
Bildelementgröße (Flughöhe 830 km)	1.1 - 4.0 km
Breite des erfaßten Geländestreifens	3000 km
Anzahl der Bildelemente in einer Zeile	2048

Die Nimbus-Satelliten richten ihr Hauptaugenmerk auf Ozeane und Atmosphäre. Nimbus-7 befindet sich auf einer polaren Umlaufbahn in 925 km Höhe und ist unter anderem mit einem passiven Mikrowellenradiometer SMMR (scanning multichannel microwave radiometer) ausgestattet:

Frequenzbereiche	Bildelementgrößen
6.6 GHz	150 km
10.7 GHz	90 km
18.0 GHz	60 km
21.0 GHz	60 km
37.0 GHz	30 km
Breite des erfaßten Geländestreifens	780 km

Da jeweils vertikale und horizontale Polarisation getrennt aufgenommen werden, ergibt es insgesamt 10 Kanäle. Beim Abtasten wird durch konische Abtastung (siehe 3.4.2., Bild 3.4-6) ein konstanter Beobachtungswinkel von ca. 50 gon erreicht. Die Bildelemente sind daher am Boden Ellipsen (z.B. im 37.0-GHz-Kanal 28 x 17 km). Sie werden im Zuge der Vorverarbeitung auf die oben angegebenen Pixelgrößen transformiert, wobei für jedes Bildelement die geographischen Koordinaten gerechnet und auf dem CCT ausgewiesen werden. Der 6.6-GHz-Kanal weist nicht nur eine sehr schlechte geometrische Auflösung auf, sondern ist auch in Europa sehr stark durch verschiedene Mikrowellensendeanlagen - vor allem Flugsicherungsradar - "verunreinigt". Wegen ihrer relativ guten geometrischen Auflösung werden vor allem die beiden 37.0-GHz-Kanäle für meteorologische Klimastudien verwendet.

Mikrowellen-Radiometerdaten bieten grundsätzlich die Möglichkeit, die atmosphärischen Einflüsse bei Flugzeugaufnahmen und Aufnahmen mit hochauflösenden Satelliten abzuschätzen. Hier ist noch viel Forschungsarbeit zu leisten. Anwendungsbeispiele der meteorologischen Satelliten in der Fernerkundung hat z.B. Curran, (1985) zusammengestellt; bei ihm findet man auch eine reichhaltige Literaturliste.

#### 4.2.7 MOMS mit Space Shuttle

An Bord der 7. (Juni 1983) und 11. (Februar 1984) bemannten Space Shuttle-Mission wurde auch die digitale Zeilenkamera MOMS (3.2.2) erprobt. Die Flughöhe betrug 300 km, sodaß sich auf Grund der Detektorgröße von 16 µm und einer Brennweite von 237 mm (3.2.2) eine Bildelementgröße von 20 m auf der Erdoberfläche ergibt (Bild 4.2-23). Die Daten wurden an Bord auf Magnetband mit einer Datenrate von 40 Mbits/s aufgezeichnet. Bei beiden Missionen wurden insgesamt 3.5 Mill. km<sup>2</sup> erfaßt, wobei von Europa keine Aufnahmen existieren. Auf die Weiterentwicklung und auf künftige Missionen von MOMS wird im Abschnitt 4.2.11e eingegangen.



*Bild 4.2-23: MOMS-Aufnahme vom Februar 1984 südöstlich von Riyadh. Die dunklen Kreisflächen sind die berechneten Gebiete mit einem Durchmesser von ca. 1 km (Bildmaßstab etwa 1:300000).*

#### 4.2.8 Meßkameras im Space Shuttle

An Bord der 9. (28.11. - 7.12.1983) bemannten Space-Shuttle-Mission der NASA war auch das von der europäischen Weltraumbehörde ESA entwickelte Spacelab. Zu den 37 ausgewählten Experimenten gehörten auch Aufnahmen mit einer Zeiss-Reihenmeßkamera RMK 30/23 (3.1.1.1). Die Flughöhe betrug 250 km, d.h. die Bilder haben einen Maßstab 1:830000 ( $\hat{=}$  0.30/250000). Mit dem Schwarzweißfilm Kodak Double X Aerographic 2405 wurden 470 Bilder, davon etwa 10 über dem westlichen Teil Österreichs, und mit dem Farbinfrarotfilm Kodak 2443 (Tab. 3.1-23) 550 Bilder aufgenommen. Insgesamt wurden 11 Mill. km<sup>2</sup> der Erdoberfläche gedeckt. Die Längsüberdeckung beträgt 60%, teilweise 80%, sodaß die Bilder stereoskopisch betrachtet werden können.

Bei diesem Flug gab es noch keine Bewegungskompensation. Die Fluggeschwindigkeit betrug 27000 km/h; sie ergibt sich mittels Gleichung (4.2-6) für eine Flughöhe von 250 km. Die Bildwanderung beträgt bei einer Belichtungszeit von 1/500 s bereits 18 µm im Bild, das entspricht 15 m im Gelände (Lösung der Aufgabe 3.1-4). Infolge der relativ großen Bildwanderung kann des-

halb das Auflösungsvermögen im günstigsten Fall 56 lp/mm betragen (Gleichung (3.1-6)). Für den nächsten Flug, der 1986 geplant war aber immer wieder verschoben wurde, wird eine Zeiss-Kamera mit Bewegungskompensation benutzt werden. Die Auflösungstests der entwickelten Filme ergab ein geometrisches Auflösungsvermögen zwischen 25 und 40 lp/mm. Daraus ergibt sich die Größe der noch erkennbaren Details - entsprechend Abschnitt 3.1.1.2.4 - zwischen 17 und 10 m. Bild 4.2-24 zeigt ein Beispiel. Dieses Experiment mit einer metrischen Kamera ist in der Literatur ausführlich zusammengestellt: (ESA SP-209 (1985), Togliatti (1987)). Im September 1990 soll das Experiment wiederholt werden, und zwar mit Bewegungskompensation in der RMK 30/23 und mit dem Kodak-Film Panatomic-X mit der bekannten guten geometrischen Auflösung (siehe Tab. 3.1-23) und einem Farbinfrarotfilm (Schröder, Stätter (1988)).

Ein ähnliches Projekt in Verbindung mit dem Space Shuttle verfolgen auch die Amerikaner. Die Fa. ITEK (Optical Systems Division of Litton Industries) hat eine eigene Meßkammer (LFC = large format camera) für den Welt-raum entwickelt<sup>1</sup>. Das Format beträgt  $23 \times 46 \text{ cm}^2$ , die Kammerkonstante 30 cm und die größte Blende 1:6. Die Kamera hat eine Bewegungskompensation. Zukunftsorientiert sind auch die 12 Rahmenmarken. Die maximale Objektiverzeichnung  $\Delta\rho$  beträgt 20  $\mu\text{m}$ . Im Rahmen der ersten Mission (5.10.1984 bis 13.10.1984) mit Space Shuttle 41G hat man 2160 Bilder (1520 Bilder mit Schwarzweißfilm Kodak High Definition 3414 bzw. 3412, 320 Bilder in Farbe und 320 Bilder in Farbinfrarot) gemacht. Die Flughöhen betragen 240 bis 370 km, die Belichtungszeiten 1/250 bis 1/50 s; das Auflösungsvermögen der entwickelten Filme beträgt etwa 80 lp/mm. Die Auflösung ist also etwa um das 2- bis 3fache besser als bei den Spacelabbildern. Die Erkennbarkeit liegt etwa bei 5 m. Von Europa gibt es nur wenig wolkenfreie Bilder. Das für die Stereoskopie wichtige Basis/Höhenverhältnis beträgt bei 55% Längsüberdeckung 2:3 (Tab. 4.1-3). Literatur: Doyle, Murai (1986).

Bei sowjetrussischen Missionen spielen die photographischen Sensoren eine verhältnismäßig große Rolle. Im Abschnitt 4.2.10 wird darauf näher eingegangen.

<sup>1</sup> Mit zusätzlichen Stellarkameras, die ein Filmformat von  $70 \times 70 \text{ mm}^2$  haben, werden die Neigungen und die Höhenreferenz dokumentiert.



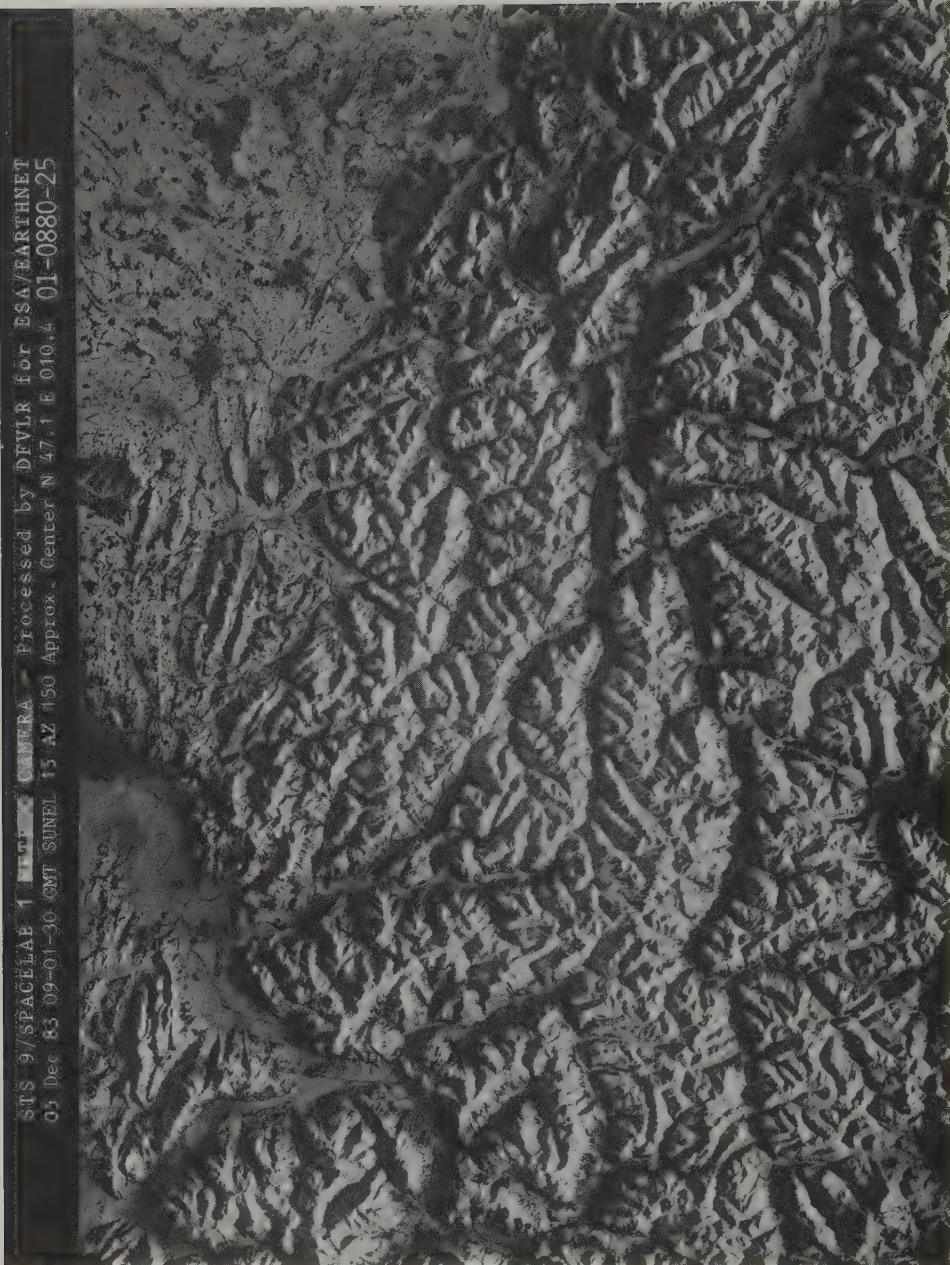


Bild 4.2-24: RMK-Aufnahme vom 5.12.1983, 10.02 MEZ etwa  
im Maßstab 1:830000



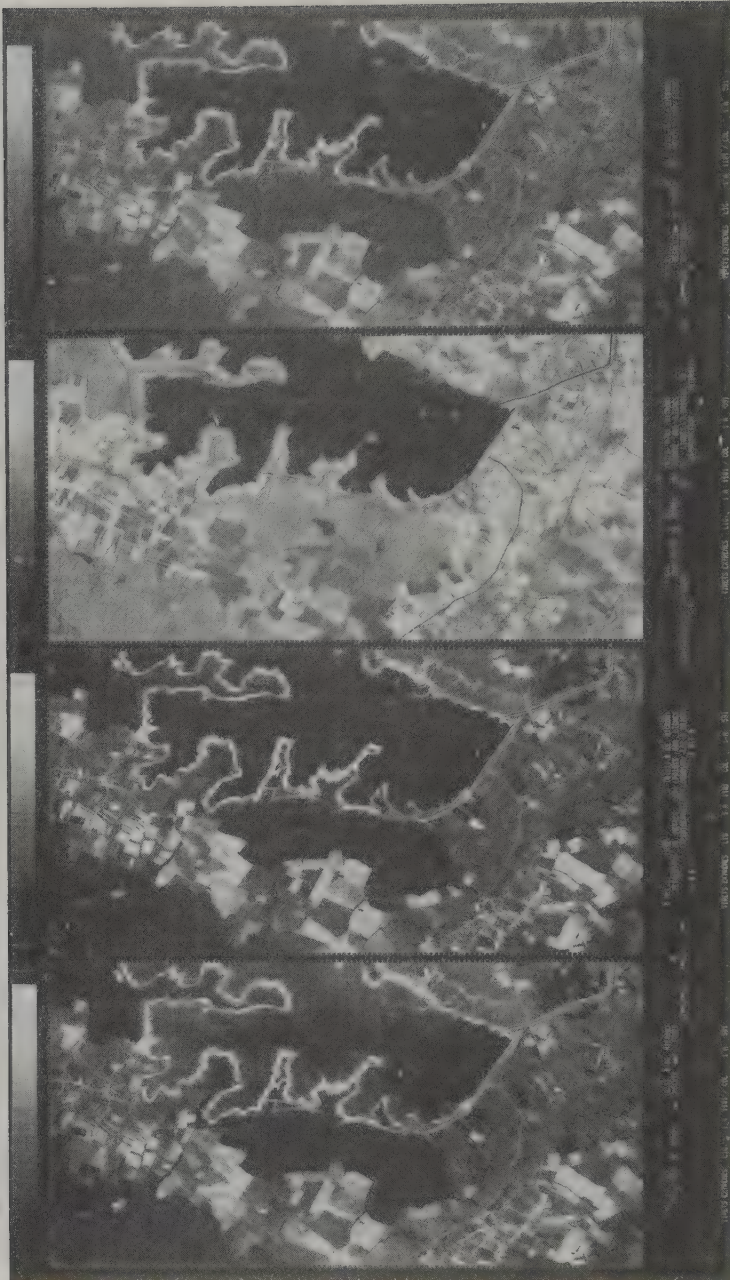
#### 4.2.9 SPOT

Der am 22.2.1986 mit der Trägerrakete Ariane gestartete und von Frankreich, Belgien und Schweden finanzierte SPOT ( $\hat{=}$  Systeme Pour l'Observation de la Terre) hat zwei digitale Zeilenkameras (3.2.2) an Bord. Ein solches Sensorsystem - mit HRV (high resolution visible) bezeichnet - kann entweder im panchromatischen Modus (P-Modus) oder im multispektralen Modus (XS-Modus) betrieben werden. Die erfaßten Spektralbereiche und weitere technischen Details sind in der folgenden Tabelle zusammengefaßt:

	XS-Modus	P-Modus
Spektralbereiche	0.50 - 0.59 $\mu\text{m}$ 0.61 - 0.68 $\mu\text{m}$ 0.79 - 0.89 $\mu\text{m}$	0.51 - 0.73 $\mu\text{m}$
Öffnungswinkel (in Zeilenmitte)	0.024 mrad	0.012 mrad
Bildelementgröße (832 km Flughöhe)	20 m	10 m
Anzahl der Bildelemente in einer Zeile	3000	6000
Breite des erfaßten Geländestreifens	60 km	60 km

Tab. 4.2-25: Technische Daten von SPOT

Die wesentlich bessere geometrische Auflösung bot sich im panchromatischen Modus an, da infolge der größeren Breite  $\Delta\lambda$  des Spektralbereiches eine größere Bestrahlungsstärke für die Aktivierung der (sehr kleinen) Detektoren zur Verfügung steht. (Gleichung (3.2-44) besagt, daß die rauschäquivalente Reflexionsgradänderung  $NE\Delta\rho$  reziprok zur Breite  $\Delta\lambda$  des Spektralbereiches ist.) Bild 4.2-26 zeigt eine SPOT-Aufnahme.



*P-Modus*  
*0.51-0.73 μm*

*0.79-0.89 μm*

*XS-Modus*  
*0.63-0.69 μm*

*0.51-0.58 μm*

*Bild 4.2-26: SPOT-Aufnahme (Simulation)*

Die Daten können bei SPOT direkt zu Bodenstationen übertragen oder - außerhalb des Empfangsbereiches - auf Magnetbändern im Satelliten vorübergehend gespeichert werden. Bei SPOT ist die wichtigste Bodenstation Toulouse (Frankreich); weitere Stationen befinden sich in Kiruna (Schweden), in Kanada und in Bangladesch. Für die Abschätzung der zu übertragenden Datenmenge müssen wir noch die Umlaufzeit wissen. Sie beträgt bei SPOT 101.4 min. Im P-Modus fällt deshalb mindestens folgende Datenmenge in der Sekunde an, wobei ein Bildelemente mit 8 Bits dargestellt wird (Erdumfang:- 40000 km):

$$\frac{40000000 \cdot 8 \cdot 6000}{101.4 \cdot 60 \cdot 10} \approx 31600000 \text{ Bits/s} = 31.6 \text{ Mb/s}$$

Im XS-Modus lautet die entsprechende Zahl:

$$\frac{40000000 \cdot 8 \cdot 3000 \cdot 3}{101.4 \cdot 60 \cdot 20} \approx 23700000 \text{ Bits/s} = 23.7 \text{ Mb/s}$$

Diese Datenraten können sich verdoppeln, denn im SPOT sind zwei HRV-Sensorsysteme enthalten, die parallel betrieben werden können. Diese beiden Systeme können für Senkrechtaufnahmen benutzt werden (Bild 4.2-27). In diesem Fall wird ein Gesamtstreifen mit einer Breite von 117 km aufgenommen, wobei sich die Einzelstreifen 3 km überlappen.

Im Strahlengang der HRV-Systeme ist ein Spiegel eingeschaltet, der von der Bodenstation aus verschwenkt werden kann. Damit können auch Schrägaufnahmen hergestellt werden (Bild 4.2-28), auch wenn das Interessensgebiet verhältnismäßig weit von der Spur des Satelliten entfernt liegt. Die Auslenkung, die in 45 Schritten zu jeweils  $0.6^\circ$  unterteilt ist, beträgt maximal  $27^\circ$ . Die Streifenbreite am Rand beträgt laut Beziehung (3.2-2) mindestens  $60/\cos^2 27^\circ \approx 80$  km. Der Gesamtbereich, der bei einem Überflug überwacht werden kann, hat eine Breite von 950 km (Bild 4.2-28). Dadurch kann man z.B. den Wolken bei der Aufnahme ausweichen oder für eine Waldinventur im wesentlichen nur die bewaldeten Gebiete aufnehmen.

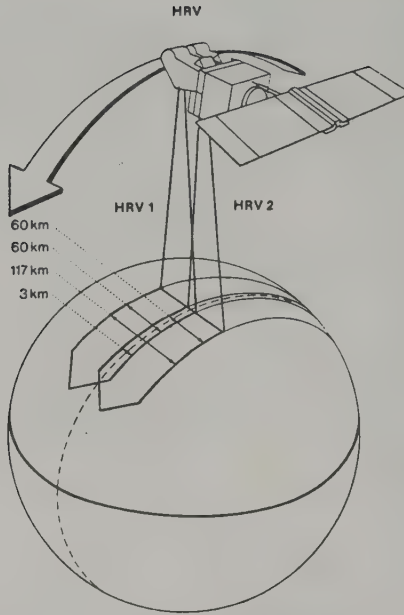


Bild 4.2-27: Senkrechtaufnahme im Parallelbetrieb

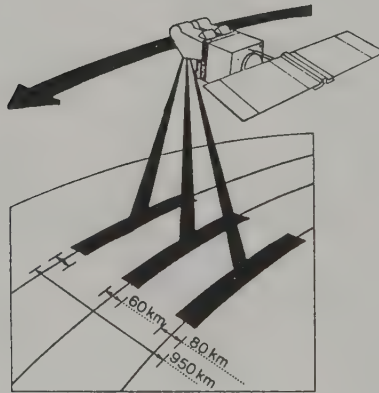


Bild 4.2-28: Schrägaufnahmen

Schrägaufnahmen haben weiterhin den Vorteil, daß in verhältnismäßig kurzen Zeitabständen das gleiche Interessensgebiet - z.B. bei der Überwachung einer Katastrophe - aufgenommen werden kann (Bild 4.2-29). Dabei kann das eine HRV-System im panchromatischen Modus und das andere im multispektralen Modus arbeiten.

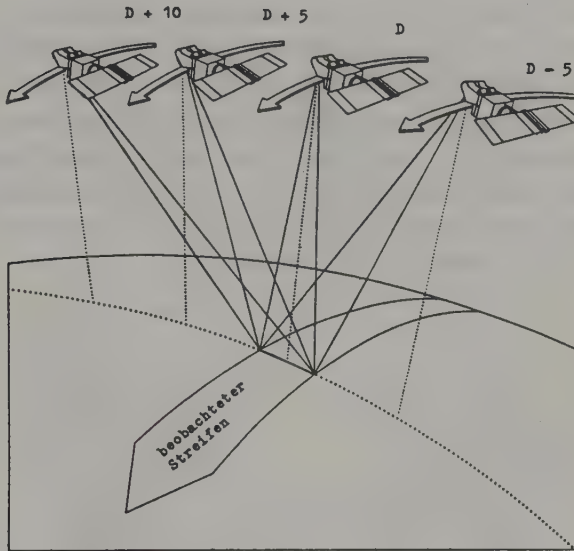


Bild 4.2-29: Wiederholungsaufnahmen

Für das Verständnis der im Bild 4.2-29 angenommenen 5-Tagesperiode ist eine detaillierte Betrachtung der Bahnparameter von SPOT erforderlich. SPOT kommt nach 369 Umläufen wieder auf die gleiche Spur. Dazwischen liegen 26 Tage. Im Sinne der Beziehung (4.2-11) wird  $n = 369$  zerlegt in  $369 = 26 \cdot 14.1923$ . Ein Umlauf dauert somit  $1440/14.1923 \approx 101.46$  min. Die Umlaufbahnen eines Tages haben am Äquator, der einen Umfang von 40075 km besitzt, einen Abstand von  $40075/14.1923 \approx 2824$  km.

Die 15. Bahn ist gegenüber der 1. Bahn um  $2824 \cdot 0.1923 = 543$  km versetzt, ein Betrag, der selbst mittels Schrägaufnahme nicht überbrückt werden kann. Betrachten wir dagegen die Umlaufbahnen nach 5 Tagen, so sind sie den Bahnen des ersten Tages sehr nahe: Nach 5 Tagen sind  $5 \cdot 14.1923 = 70.9615$  Bahnen zurückgelegt. Die 72. Bahn ist gegenüber der 1. Bahn nur noch um



$2824 \cdot 0.0385 \approx 108$  km versetzt. Die 73. Bahn ist gegenüber der 2. Bahn ebenfalls nur noch um 108 km versetzt usw. Diese Versetzungen sind so gering, daß einerseits die parallelen Senkrechtaufnahmen (Bild 4.2-27) eine lückenlose Überdeckung ergeben und andererseits mittels Schrägaufnahme ohne weiteres das gleiche Interessensgebiet wie vor 5 Tagen aufgenommen werden kann.

Im Bild 4.2-30 (links) sind die 108 km versetzten Satellitenbahnen und oben die entsprechenden Tage - in der Form des Zuschlages zum Tag D der Senkrechtaufnahme - eingetragen. Durch den maximalen Neigungswinkel der Aufnahmen von  $\pm 27^\circ$  kann innerhalb von 26 Tagen jeder Geländeausschnitt am Äquator 7mal beobachtet werden. In der geographischen Breite von  $45^\circ$  kann jeder Geländeausschnitt innerhalb von 26 Tagen sogar 11mal beobachtet werden (Bild 4.2-30, rechts). Die Satellitenbahnen rücken nämlich in dieser geographischen Breite auf  $108 \cdot \cos 45^\circ = 76$  km zusammen.

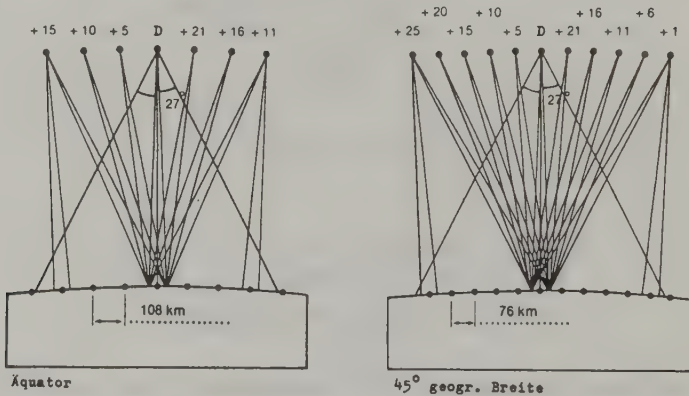


Bild 4.2-30: Wiederholungsaufnahmen am Äquator (links) und in einer geographischen Breite von  $45^\circ$  (rechts)

Die Möglichkeit zur Schrägaufnahme gestattet auch, Stereobilder mit einem Basis/Höhenverhältnis von ca. 1:1 aufzunehmen (Bild 4.2-31, in dem man auch die verschwenkten Spiegel im Strahlengang erkennt). Auf diese Weise erlaubt SPOT einerseits eine stereoskopische Interpretation der Bilder (mit einem Überhöhungsfaktor  $u_z \approx 6$ , Tab. 5.1-10) und andererseits eine höhenmäßige Auswertung mit einer Genauigkeit von ca.  $\pm 10$  m. (Rodríguez et al, 1988). Bild 4.2-32 zeigt ein SPOT-Stereobild.

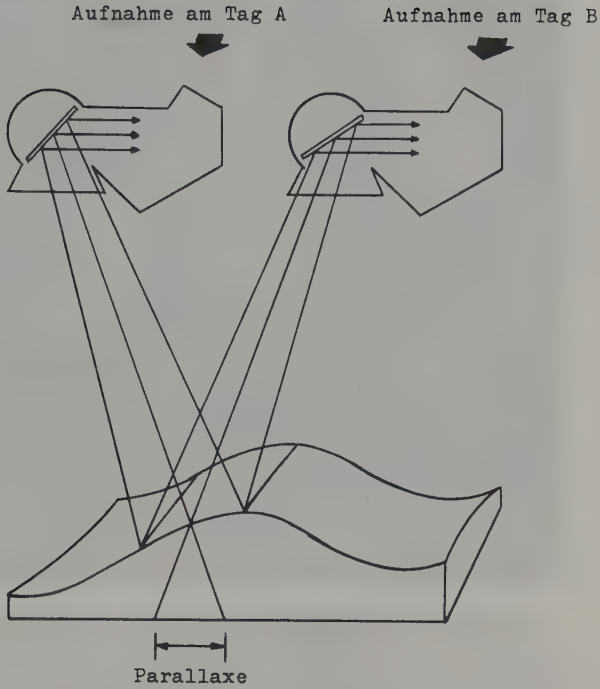


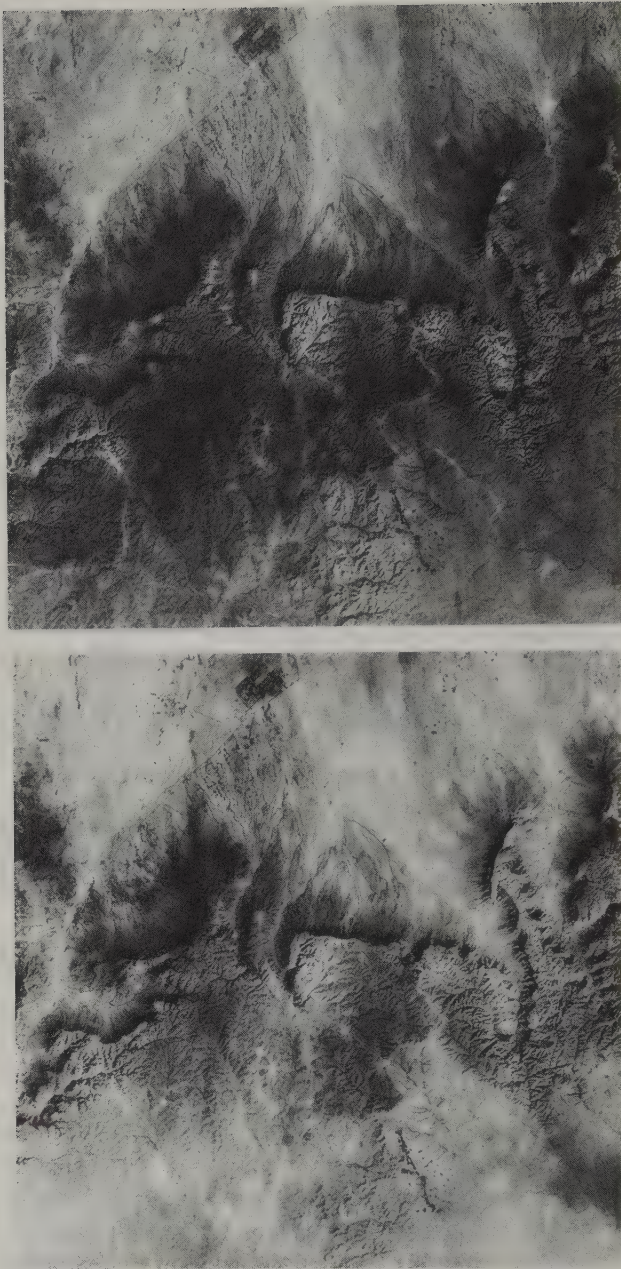
Bild 4.2-31: Stereoaufnahmen

Zur Ergänzung der Bahnparameter ist noch auf die Flughöhe einzugehen. Sie berechnet sich aus der Umlaufzeit  $T_s = 101.46$  min mittels (4.2-7):

$$H = \sqrt[3]{3 \cdot 986005 \cdot 10^{14} (101.46 \cdot 60 / 2\pi)^2 - 6370000} \approx 836000 \text{ m} \hat{=} 836 \text{ km}$$

Die Umlaufbahn von SPOT ist sonnensynchron. Dies wird durch eine Inklinati-  
on  $i \neq 90^\circ$  erreicht. Sie berechnet sich aus (4.2-12):

$$\cos i = -2\pi / (63.5 \cdot (6378/7214)^{7/2}) = -0.15 \quad \rightarrow \quad i = 98.8^\circ$$



*Bild 4.2-32: SPOT-Stereobild (Aufnahme und Copyright SPOT IMAGE, beigestellt von GEOSPACE-Beckel Satellitenbilddaten, Bad Ischl, SPOT IMAGE Authorized Distributor, Österreich)*

Die Rektaszension der Satellitenbahn ist so gewählt, daß der Äquator auf der Tagbahn, das ist die Bahn von Norden nach Süden, um 10<sup>30</sup> Uhr Ortszeit überquert wird. Der Überflug in 48° nördlicher Breite (z.B. Wien und München) erfolgt um ca. 11<sup>12</sup> Uhr Ortszeit (Bild 4.2-33). Die MEZ (mitteleuropäische Zeit) für einen bestimmten Punkt auf der Breite 48° (z.B. für 17° ö.L. von Gr.) folgt dann aus folgender Berechnung: 11<sup>12</sup> - (17° - 15°)·4 min = 11<sup>04</sup> Uhr MEZ. Solche Zeitermittlungen sind für Bodenbeobachtungen erforderlich, wenn sie synchron zum Satellitenüberflug durchzuführen sind.

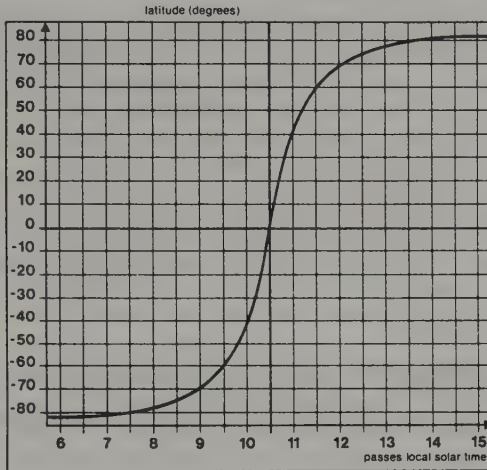


Bild 4.2-33: Ortszeit der SPOT-Satellitenbahnen in Abhängigkeit der geographischen Breite

Die Produkte von SPOT werden über die national autorisierten Verteiler von SPOT IMAGE vertrieben. Es werden unter anderem folgende Produkte angeboten:

P-Modus

CCT	60 x 60 km <sup>2</sup>	Rohdaten	4.500 DM
CCT	60 x 60 km <sup>2</sup>	mit Paßpunkten geometrisch rektifiziert	5.300 DM
Schwarzweiß-Filmpositiv	1:200000	mit Paßpunkten geometrisch rektifiziert	4.000 DM

XS-Modus

CCT	60 x 60 km <sup>2</sup>	Rohdaten	3.600 DM
CCT	60 x 60 km <sup>2</sup>	mit Paßpunkten geometrisch rektifiziert	5.000 DM
Farbdia	1:200000	mit Paßpunkten geometrisch rektifiziert	4.000 DM

Die einzelnen Szenen sind ähnlich numeriert wie bei LANDSAT (Bild 4.2-19). Da bei SPOT auch Schrägaufnahmen gemacht werden können, ist die Zuordnung allerdings nicht ganz so einfach. Von SPOT IMAGE gibt es Karten mit den



eingezeichneten Szenennummern, außerdem einen Katalog, der die aufgenommenen Bilder mit ihren charakteristischen Daten enthält.

Da SPOT für die nächsten Jahre - neben TM von LANDSAT-5 und Folgesatelliten (4.2.3) - der wichtigste Datenlieferant für die Fernerkundung sein wird, soll noch kurz auf die Zukunftspläne des französischen Raumforschungszentrums CNES eingegangen werden. Neben SPOT-1, der am 22.2.1986 gestartet wurde, soll 1988 SPOT-2, der in seiner technischen Konzeption SPOT-1 entspricht, gestartet werden. Um die Kontinuität des Projektes zu gewährleisten, wurde bereits der Bau von SPOT-3 und SPOT-4 beschlossen. Sie sollen 1990 und 1992 in die Umlaufbahn gebracht werden. Bei SPOT-3 und 4 wird - neben anderen Verbesserungen - im XS-Modus zusätzlich ein Spektralbereich zwischen 1.5 und 1.7  $\mu\text{m}$  hinzukommen.

Aufgabe 4.2-14: Man skizziere die Umlaufbahnen von SPOT am Äquator in der gleichen Weise, wie das Bild 4.2-17 die Bahnen von LANDSAT-4 und 5 zeigt.

Aufgabe 4.2-15: Wie oft kann ein Interessensgebiet in  $30^\circ$  geographischer Breite innerhalb von 26 Tagen von SPOT aufgenommen werden?

Aufgabe 4.2-16: Man gebe die Breite der Streifenpaare auf der Erdoberfläche an, die mit SPOT noch erkannt werden können, und zwar

- a) im P-Modus für Senkrechtaufnahmen sowohl für den linken als auch rechten Bildrand des 60 km breiten Streifens (Bild 4.2-27) und
- b) im XS-Modus für Schrägaufnahmen unter einem Winkel von  $27^\circ$  sowohl für den linken als auch rechten Bildrand des ca. 80 km breiten Streifens (Bild 4.2-28).

#### 4.2.10 Weitere Satelliten

Im militärischen Bereich gibt es eine große Anzahl weiterer Satelliten, die teilweise anders konzipiert sind und technisch einen höheren Standard aufweisen als die zivilen erdkundenden Satelliten. Einen guten Überblick über diese Satelliten und zusätzliche Literatur findet man bei Curran (1985) und Adam (1986). Länderweise gegliedert gibt es folgende Angaben:

USA: Eine Gruppe von Satelliten wird (vermutlich) auf eine stark elliptische Umlaufbahn gebracht, sodaß im Interessensgebiet Flughöhen von 150 km möglich sind. Als Sensoren benutzte man bisher bevorzugt photographische Kameras mit Brennweiten bis zu 6 m, sodaß Details von 50 cm auf der Erdoberfläche erkannt werden. Die belichteten Filme werden entweder mit Kapseln - vorwiegend über Ozeane - abgeworfen oder in unbemannten Satelliten entwickelt, abgetastet und die Signale zu einer Bodenstation übertragen. Auch Multispektralabtaster in 250 km Höhe werden benutzt, die eine Bildelementgröße von 5 m aufweisen.

Es besteht Grund zur Annahme, daß die neueste Entwicklung auf dem Gebiet der militärischen Aufklärungssatelliten, die gleichzeitig die Grenze des heute technisch Möglichen darstellt, durch folgende Angaben charakterisiert werden kann: Brennweite ca. 60 m (gefalteter Strahlengang), Durchmesser der Optik ca. 2.4 m, Detektor-Bildelementgröße ca. 15  $\mu\text{m}$ . Damit ergibt sich bei 275 km Flughöhe auf Grund rein geometrischer Überlegungen eine Gelände-Bildelementgröße von ca. 7 cm. Auf Grund von Beugungseffekten ist die Bildelementgröße gemäß Gleichung (3.1-3) jedoch etwa doppelt so groß. Man beachte, daß der Durchmesser der Optik der begrenzende Faktor ist. Das Instrument dürfte wegen dieses großen Durchmessers schwerer als 10 Tonnen sein!

UdSSR: Auch von der UdSSR sind Satelliten mit ähnlichen Charakteristika wie jene der USA bekannt. Darüber hinaus hat in der UdSSR die Multispektralka-



mera der Fa. Jenoptik, DDR (3.1.2), eine große Bedeutung erlangt. Sie wurde erstmals vom 15. - 23.9. 1976 mit Sojus-22 erprobt; sie ist seit 1978, in einer leicht modifizierten Version als MKF-6M, auf den sowjetrussischen Orbitalstationen im operationellen Einsatz. Auch der Einsatz von Mikrowellen Sensoren dürfte eine große Rolle spielen.

Neben der Multispektralkamera MKF-6M werden in der UdSSR auch einige großformatige Meßkameras im Weltraum benutzt. Diese Technik ist auf sehr hohem Entwicklungsstand, denn die Aufnahmen können auch mit unbemannten Satelliten durchgeführt und die Kassetten mit den belichteten Filmen zur Erde gebracht werden. Einige technische Details zu den Kameras:

- KATE-140 mit einer Brennweite von 140 mm und einem Format von  $18 \times 18 \text{ cm}^2$  für panchromatische Filme mit dem Spektralbereich 500 - 700 nm.
- KATE-200 mit einer Brennweite von 200 mm und einem Format von  $18 \times 18 \text{ cm}^2$  für Farbinfrarotfilme mit den Spektralbereichen 500 - 600, 600 - 700 und 700 - 900 nm.
- KFA-1000 mit einer Brennweite von 1000 mm und einem Format von  $30 \times 30 \text{ cm}^2$  für einen Zweischichtenfilm mit den Spektralbereichen 570 - 670 nm und 670 - 800 nm.

Bei einer Flughöhe von 250 km erkennt man in KFA-1000-Aufnahmen Details von etwa 5 m Größe. Bilder der sowjetrussischen Missionen können seit kurzem auch im Westen gekauft werden. Weiterführende Literatur: Krämer (1988).

China und Indien: China betreibt seit 1975 Satelliten für erdkundende und militärische Zwecke, die mit einem Multispektralabtaster - vergleichbar mit LANDSAT-1,2,3 - ausgerüstet sind, ebenso Indien seit 1979.

#### 4.2.11 Einige Zukunftsprogramme der Fernerkundung aus dem Weltraum

Bei mehreren Satellitenprogrammen wurde bereits auf deren Fortsetzung eingegangen. In der Tab. 4.2-34 sind die künftigen Fernerkundungsmissionen - geordnet nach den einzelnen Ländern - zusammengestellt.

a) Die europäische Weltraumorganisation (ESA = European Space Agency) besteht seit 30.10.1980 und umfaßt zur Zeit die Mitgliedstaaten Belgien, Dänemark, Bundesrepublik Deutschland, Frankreich, Großbritannien, Irland, Italien, Niederlande, Norwegen, Österreich, Schweden, Schweiz und Spanien. Die ESA hat die Aufgabe:

Die Zusammenarbeit der europäischen Staaten für ausschließlich friedliche Zwecke auf dem Gebiet der Weltraumforschung und Weltraumtechnologie im Hinblick auf die Nutzung für die Wissenschaft und für die Weltraumanwendungssysteme sicherzustellen und zu entwickeln.

Die ESA hat ihren Sitz in Paris und mehrere Niederlassungen in den Mitgliedsstaaten. Die wichtigsten Niederlassungen sind:

- Das europäische Zentrum für Weltraumforschung und -Technologie (ESTEC = European Space Technology Centre) in Noordwijk (Niederlande) entwirft, entwickelt und erprobt die Raumfahrtgeräte.

	1986	87	88	89	90	91	92	93	94	95	1996
ESA	Atmosph.		● P2	● MO1	● MO2	● MO3			○ MET(2.Gen.)		
	Wasser				● ERS-1			○ ERS-2			
	Land							○ Solid Earth		○ POP(a.m.)	
USA	geost.	● GEOS-7			● GEOS-1	● -J	○ -K	○ -L	○ -M		
	Atmosph.				● a.m.	● a.m.	● p.m.	○ a.m.		● p.m.	
	polar	● NOAA-10	● -H	● -D	● -J	● -J	● -K	○ -L		○ -M	
	Wasser					● POSEIDON			○ POP(p.m.)		
JAPAN	Land			● LANDSAT-6				○ LANDSAT-7			
	Atmosph.			● GMS-4				○ GMS-5	○ GMS-6		
	Wasser	● MOS-1		● MOS-2							
	Land					● J-ERS-1					
FRANKREICH		● SPOT-1		● SPOT-2	● SPOT-3	● TOPEX	○ SPOT-4	○ SPOT-5			
				● ISRO MEOS		● NASA STEREO-MOMS					
BRD											

● in Betrieb      ○ in Entwicklung      ○ geplant

Tab. 4.2-34: Künftige Fernerkundungsmissionen

- Das europäische Weltraum-Operationszentrum (ESOC  $\hat{=}$  European Space Operating Centre) in Darmstadt ist für den Betrieb der Satelliten in der Umlaufbahn und der dazu notwendigen Bodenanlagen zuständig. Das ESOC betreibt ein weltweites Bodenstationsnetz.
- Das europäische Weltrauminstitut (ESRIN  $\hat{=}$  European Space Research Centre) in Frascati bei Rom beherbergt gegenwärtig zwei Abteilungen: Den Informationsabrufdienst (IRS  $\hat{=}$  information retrieval service) und EARTH-NET, das Bild- und Meßdaten von Fernerkundungssatelliten sammelt, verarbeitet und verteilt.

Von der ESA wurde die Trägerrakete ARIANE entwickelt. Die Startrampe ist in Kourou (franz. Guayana), das nur  $5.1^{\circ}$  nördlich des Äquators liegt und deshalb durch die hohe, von der Erdrotation verursachte Fliehkraft gute Startbedingungen bietet. Mit ARIANE wurden und werden u.a. die SPOT-Satelliten in den Weltraum gebracht wurden und werden. Eine wichtige Aufgabe der ESA ist auch der Betrieb des Wettersatelliten METEOSAT (4.2.6). Auf dem Gebiet der Erderkundung ist die ESA mit dem Bau des Spacelab, in dem sich u.a. die metrische Kamera (4.2.8) befand, hervorgetreten. Über EARTHNET bekommt man nicht nur die Aufnahmen der ESA-Missionen sondern auch Aufnahmen von LANDSAT (4.2.2 und 4.2.3), SEASAT (4.2.4), HCMM (4.2.5), NIMBUS (4.2.5), SPOT (4.2.9) etc.

Wie aus der Tab. 4.2-34 hervorgeht, ist das zur Überwachung der Atmosphäre geeignete METEOSAT-Programm bis ins Jahr 2000 garantiert. Die damit zusammenhängenden Aufgaben besorgt eine neue europäische Organisation mit dem Namen EUMETSAT, die in einem Naheverhältnis zur ESA steht. Die nächsten METEOSATs starten im Frühjahr 1988 (P2), im Herbst 1988 (MO1), im Frühjahr 1990 (MO2) und im Frühjahr 1991 (MO3). Diese Satelliten werden Bilder bis 1995 liefern. Für 1994 ist der Start des ersten METEOSAT der 2. Generation mit erheblich verbesserten technischen Einrichtungen geplant.

Der Start des ersten Fernerkundungssatelliten der ESA ist - mit der Trägerrakete ARIANE - für 1990 geplant. Er trägt den Namen ERS-1; ERS-2 soll 1993 in den Weltraum kommen. ERS-1,2 sind auf die küstennahe Zonen, auf das offene Meer und auf die Polareisregionen ausgerichtet. ERS-1,2 sollen aber auch hochauflösende Allwetterbilder vom Festland liefern. An Bord gibt es u.a. ein Radar mit synthetischer Apertur (SAR, 3.4.3.2) im C-Band und ein Radar zur Messung der Meereswellenstruktur. Es ist an eine 780 km hohe quasi-polare Kreisbahn mit einer Wiederholungsrate von drei Tagen für jeden

Punkt der Erde gedacht. Besonderes Augenmerk wird auf eine schnelle Daten-Übertragung und Datenverarbeitung gelegt. Innerhalb von drei Stunden sollen die Informationen an den Kunden ausgeliefert sein, sodaß ERS-1,2 besonders für schnell sich verändernde Phänomene interessant sein wird.

Unter dem Schlagwort "Solid Earth" ist für 1993 eine Satellitenmission geplant, die auf die Erforschung der Physik der Erde ausgelegt ist. Zu diesem Zweck sind zwei Satelliten vorgesehen, einer in 7000 km Höhe und einer in 160 - 200 km Höhe. Durch hochgenaue Positionsbestimmungen im Zentimeterbereich erhält man aus den Bahnstörungen des erdnäheren Satelliten Informationen über die Potentialflächen des Erdschwerefeldes, über die Variation der Geschwindigkeit der Erdrotation und über Polschwankungen (= Veränderung der Rotationsachse der Erde). Man erwartet sich auch Aussagen über das Erdmagnetfeld sowie über aktive physikalische Kräfte und Prozesse im Erdinneren, die für Naturkatastrophen - wie Erdbeben und Vulkanausbrüche - verantwortlich sind.

Der nächste große Schritt in der europäischen Weltraumtechnik ist die Etablierung bemannter und rückführbarer Orbitalsysteme. Mit der Entwicklung der damit zusammenhängenden Großprogramme, die mit COLUMBUS und HERMES bezeichnet werden, hat die ESA bereits begonnen. Als Nutzlastträger ist die bis 1996 neu zu entwickelnde verstärkte Europarakete ARIANE-5 vorgesehen. Das Raumstationprojekt COLUMBUS wird folgende drei Elemente umfassen:

- Ein ankoppelbares Modul APM ( $\hat{=}$  attached pressurized module) das als druckgeregeltes Labor gedacht ist und Teil der von den USA geplanten internationalen Raumstation sein soll.
- Ein - zeitweilig bemanntes - frei fliegendes Modul MTFP ( $\hat{=}$  man tended free flyer), das als rein "europäische" Raumstation, wie das APM, auf einer äquatornahen Bahn in geringer Höhe (ca. 300 km) fliegen soll.
- Eine unbemannte, in polarer Bahn kreisenden Plattform (POP  $\hat{=}$  polar plattform), die vor allem für die Fernerkundung interessant sein wird.

Für die Wartung der COLUMBUS-Elemente und den Austausch von Besatzungen ist in der Anfangsphase die Verwendung der amerikanischen Space-Shuttles vorgesehen. Gegen Ende der 90er-Jahre soll der ESA mit dem Raumtransporter HERMES eine eigene bemannte Raumflugkapazität zur Verfügung stehen. Auf der polaren Plattform werden verschiedene Fernerkundungssensoren eingesetzt werden können, wobei auch an einen Austausch und Ergänzungen der Instrumente im Zuge von regelmäßigen Wartungsflügen gedacht ist. Man denkt dabei vor allem an Allwetter-Mikrowelleninstrumente für die Beobachtung des Festlandes, des Eises und der Ozeane, sowie Systeme für die Erforschung und Überwachung der Atmosphäre.

Zur polaren Plattform der ESA ist ein entsprechendes amerikanisches Gegenstück geplant, das bereits 1994 in Betrieb sein soll. Beide polare Plattformen werden so eingerichtet, daß COLUMBUS den Äquator am Vormittag (a.m. = morning orbit) und die amerikanische Plattform den Äquator am Nachmittag (p.m. = afternoon orbit) überqueren (siehe Tab. 4.2-34). Eine Vereinbarung zwischen ESA und NASA soll Parallelentwicklungen vermeiden, indem jeder Partner berechtigt ist, Geräte auf beiden Orbitalelementen installieren zu können. Dabei wird angestrebt, dieselben Instrumente sowohl auf der "Vormittags-" als auch der "Nachmittagsplattform" einzusetzen, womit sich zusätzliche interessante Aspekte für die Anwendung in der Fernerkundung ergeben. In diesem ehrgeizigen Projekt sind auch Canada und Japan einbezogen.

b) Die Vereinigten Staaten von Amerika betreiben zwei der fünf geostationären Satelliten (Bild 4.2-21) für eine permanente Überwachung des Wettergeschehens. GEOS-7 wurde im März 1987 erfolgreich in die geostationäre Umlaufbahn gebracht. Die Nachfolgesatelliten GEOS-I, J, K sind bereits in Entwicklung (Tab. 4.2-34). Weitere Satelliten sind bis zum Jahr 2000 geplant. Zur Ergänzung der Wetterbeobachtung aus den geostationären Satelliten betreibt - wie bereits im Abschnitt 4.2.6 erwähnt - die National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) noch Satelliten in nahezu polarer Bahn in einer Flughöhe von 800 - 900 km. Diese sogenannten NOAA-Satelliten sind bis zum Jahr 1995 geplant. Von 1995 an sollen die entsprechenden Aufnahmegäte in die polaren Plattformen übernommen werden. Die Bahnen der beiden, jeweils aktiven NOAA-Satelliten sind 12 Stunden gegeneinander versetzt. Die Bahnen der künftigen Satelliten sind deshalb wechselseitig als Vormittags- (a.m.) und Nachmittagsbahn (p.m.) konzipiert.

Speziell für die Überwachung der Ozeane wird ein Satellit unter dem Namen POSEIDON für 1991 vorbereitet. Diese amerikanische Mission erfolgt in Absprache mit der entsprechenden französischen Mission TOPEX (Tab. 4.2-34). Die amerikanische polare Plattform, die etwa so wie die von der ESA im Rahmen des COLUMBUS-Projektes geplante polare Plattform ausgestattet sein wird, soll bereits 1994 in Betrieb gehen. Im Gegensatz zur europäischen Station wird die amerikanische Weltraumplattform in einer Nachmittagsbahn die Erde umkreisen (POP in Tab. 4.2-34).

Wie bereits am Ende des Abschnittes 4.2.3 erläutert wurde, wird das LANDSAT-Programm des großen Erfolges wegen fortgesetzt, und zwar mit LANDSAT-6 (1989) und mit LANDSAT-7 (1993). Das LANDSAT-Programm wurde übrigens bis 1984 im wesentlichen von der öffentlichen Hand getragen und von der NASA (=



National Aeronautics and Space Administration) administriert. Seit 1984 hat die Privatfirma EOSAT ( $\hat{=}$  Earth Observation SATellite co.) sowohl den Betrieb von LANDSAT-4,5 als auch den Vertrieb der Bilder übernommen. Auch die Satelliten LANDSAT-6,7 werden von EOSAT geplant.

c) Japan betreibt einen der fünf geostationären Satelliten (Bild 4.2-21) für eine permanente Überwachung des Wettergeschehens. Z.Z. ist GMS-3 in Betrieb, allerdings mit einigen technischen Gebrechen. Der Start der nächsten Satelliten ist für 1989, 1993 und 1994 vorgesehen (Tab. 4.2-34).

Am 19. Februar 1987 wurde von der japanischen NASDA ( $\hat{=}$  National Space Development Agency) der erste Erderkundungssatellit auf eine sonnensynchrone, nahezu polare Umlaufbahn gebracht. Er trägt die Bezeichnung MOS-1 ( $\hat{=}$  marine observation satellite) und ist vor allem für die Erkundung der Ozeane ausgelegt. Mit der Flughöhe von 910 km ergibt sich eine Umlaufzeit von 103 min. Die Inklination von  $99.1^\circ$  ergibt einen Wiederholungszyklus von 17 Tagen. An Bord befinden sich drei unterschiedliche Sensoren:

- Ein multispektraler Abtaster MESSR ( $\hat{=}$  multispectral electronic self-scanning radiometer) der aus digitalen Zellenkameras besteht:

Spektralbereiche	0.51 - 0.59 $\mu\text{m}$
	0.61 - 0.69 $\mu\text{m}$
	0.73 - 0.80 $\mu\text{m}$
	0.80 - 1.1 $\mu\text{m}$
Öffnungswinkel	0.055 mrad
Bildelementgröße	50 m
Bildelemente in einer Zeile	2 x 2000
Breite des erfaßten Streifens	200 km

- Ein im sichtbaren Bereich und im thermalen infraroten Spektralbereich arbeitendes Radiometer VTIR ( $\hat{=}$  visible and thermal infrared radiometer) als mechanischer Rotationsabtaster:

Spektralbereich (sichtbar)	0.5 - 0.7 $\mu\text{m}$
Spektralbereich (thermal)	6.0 - 7.0 $\mu\text{m}$
	10.5 - 11.5 $\mu\text{m}$
	11.5 - 12.5 $\mu\text{m}$
Öffnungswinkel (sichtbar)	1.0 mrad
Öffnungswinkel (thermal)	3.0 mrad
Bildelementgröße (sichtbar)	900 m
Bildelementgröße (thermal)	2700 m
Breite des erfaßten Streifens	1500 km

- Ein abtastendes Mikrowellenradiometer MSR ( $\hat{=}$  microwave scanning radio-meter) mit mechanischer konischer Abtastung (Einfallswinkel  $90^\circ$ ):

Frequenzbereich	23.8 GHz	31.4 GHz
Öffnungswinkel	32 mrad	23 mrad
Bildelementgröße	32 km	23 km
Breite des erfaßten Streifens	317 km	

Gemäß einem Abkommen zwischen NASDA und ESA werden MOS-1-Daten von den europäischen Bodenstationen in Fucino, Kiruna und Maspalomas empfangen und über EARTHNET an Interessenten innerhalb der ESA verteilt.

Der Folgesatellit MOS-2 ist für 1989 vorgesehen. 1991 ist der Start des erdkundenden Satelliten J-ERS-1 geplant. (Tab. 4.2-34). Dieser Fernerkundungssatellit wird unter anderem mit einem SAR (3.4.3.2, Frequenzbereich 1275 MHz, Bildelementgröße 18 m, Breite des erfaßten Streifens 75 km) und einer digitalen Zeilenkamera (vom Sichtbaren bis nahen Infrarot, Bildelementgröße  $18 \times 24 \text{ m}^2$ , Breite des erfaßten Streifens 75 km, inflight stereo (siehe 4.2.11e)) ausgestattet sein. (Kawasaki, 1988).

d) In der Tab. 4.2-34 ist auch das im Abschnitt 4.2.9 ausführlich beschriebene SPOT-Programm aufgenommen, das im wesentlichen von Frankreich außerhalb der ESA finanziert wird.

e) Die Bundesrepublik Deutschland entwickelt - mit Unterstützung Indiens - ebenfalls außerhalb der ESA ein spezielles Fernerkundungsprogramm. Die Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DFVLR) hat die digitale Zeilenkamera (3.2.2 und 4.2.7) zu einer Dreizeilenkamera unter der Bezeichnung MEOSS (monocular electro-optical stereo scanner) weiterentwickelt. Eine Dreizeilenkamera (Bild 4.2-35) liefert ein Stereotriplet, wobei jeweils zwei Bilder stereoskopisch betrachtet werden können. Die beiden Bilder, die mit den vorwärts und rückwärts "schauenden" Detektorzeilen a und c aufgenommen werden, bieten eine stärkere Überhöhung des Stereomodelles als die Kombinationen a/b und b/c. Die Stereoaufnahmetechnik mit einer Zwei- oder Dreizeilenkamera nennt man "inflight stereo". Diese Aufnahmetechnik hat - z.B. im Vergleich zu SPOT (Bild 4.2-31) - den großen Vorteil, daß die Zeitdifferenzen zwischen den beiden Bildern nur einige Sekunden betragen und deshalb der Sonnenstand sowie die atmosphärischen Bedingungen für beide Bilder etwa gleich sind. Aus diesem Grund wird man mit MEOSS-Aufnahmen die Wolken und andere sich kurzzeitig ändernde Phänomene dreidimensional festlegen können. Diese Aufnahmen können mit Hilfe der digitalen Bildverarbeitung automationsgestützt ausgewertet werden, worauf im Abschnitt 6.10 näher eingegangen wird.

Einige technische Daten zur Kamera: Brennweite  $f = 61.1$  mm, Abstand zwischen den drei Detektorzeilen = 26.69 mm, Bildpunkte je Zeile = 3456, Bildelementgröße =  $10.7 \mu\text{m}$ , Zeilenfrequenz  $\nu = 131.1$  Hz, nur ein Spektralbereich zwischen 570 und 720 nm.

Einige Bahnparameter: Flughöhe = 450 km, Umlaufzeit 93.5 min, Inklination  $i = 45.60^\circ$  oder  $48.20^\circ$ .

Weitere Angaben: Bildelementgröße auf der Erdoberfläche = 78.8 m, Streifenbreite = 255.8 km, Basis = 396.1 oder  $2 \times 198$  km, Zeitdifferenz zwischen den beiden das Stereomodell bildenden Aufnahmen = 58.1 oder  $2 \times 29.05$  s, Basis/Höhenverhältnis = 0.95 und  $2 \times 0.452$ .

Aufgabe 4.2-17: Diese zu ME OSS gemachten Angaben sind stark redundant. Man stelle die Redundanz fest und überprüfe die Richtigkeit der Angaben. Außerdem überlege man sich die Bandbreite und überprüfe, inwieweit das Abtasttheorem in Flugrichtung eingehalten ist.

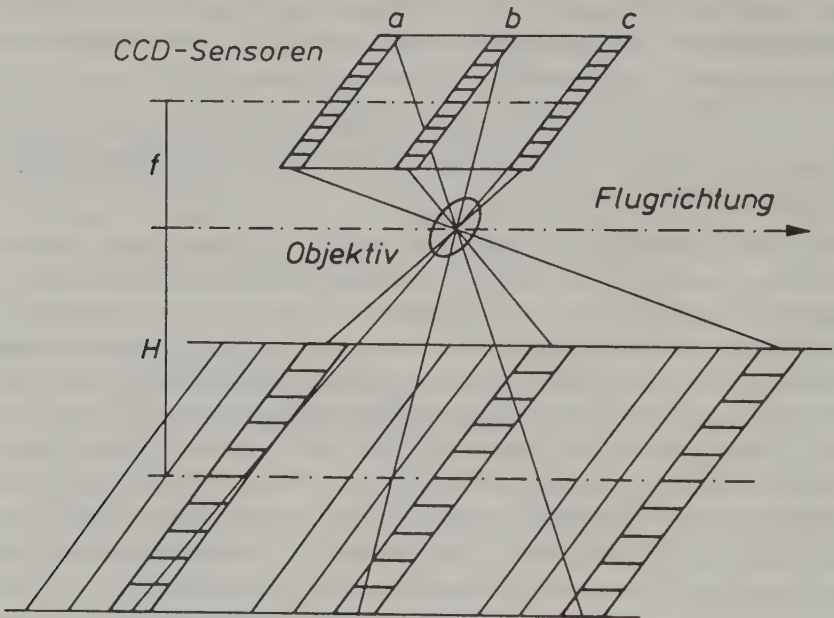


Bild 4.2-35: Aufnahmeprinzip einer Dreizeilenkamera

Der Start von ME OSS ist für 1988 von der Indischen Weltraumbehörde ISRO geplant (Tab. 4.2-34). Man erwartet von den ME OSS-Aufnahmen eine Standardabweichung von  $\pm 30$  m in der Lage und  $\pm 50$  m in der Höhe (Lanzl, 1988).

Für 1991/1992 plant die DFVLR - gemeinsam mit der NASA - eine Flugmission unter der Bezeichnung STEREO-MOMS. In der Geometrie ist dieses System dem ME OSS vergleichbar; man erwartet allerdings eine wesentlich bessere Ge-

nauigkeit, z.B. in der Höhe eine Standardabweichung von etwa  $\pm 5$  m. Die bessere Genauigkeit wird dadurch erreicht, daß die Bildelementgröße der mittleren Bildzeile 5.3 m und die Bildelementgröße der beiden geneigten Bildzeilen 10.5 m beträgt. Die Detektoren dieser drei Bildzeilen empfangen panchromatische Strahlung (500 - 810 nm). Das Neue im STEREO-MOMS ist, daß zusätzlich zur photogrammetrischen Komponente einer Dreizeilenkamera auch für thematische Problemstellungen günstige Voraussetzungen geschaffen werden. Es wird nämlich noch zusätzlich vier Spektralbereiche (435 - 510 nm, 530 - 575 nm, 655 - 685 nm und 770 - 810 nm) mit einer Bildelementgröße von 15.8 m geben. STEREO-MOMS-Aufnahmen erfassen das Gelände dreidimensional mit einer sehr hohen geometrischen Auflösung und enthalten eine beachtlich hohe Anzahl von Spektralbereichen mit einer verhältnismäßig guten spektralen Auflösung. Bei der Auswertung können deshalb die geländeformabhängigen Parameter mit den spektralen Parameter kombiniert werden (weitere Details: Bodechtel et al., 1988).

Aufgabe 4.2-18: Welche Einflüsse können bei der radiometrischen bzw. thematischen Auswertung berücksichtigt werden, wenn gleichzeitig die Geländeform bekannt ist ?

### Anhang 2.3-1: Integration über die Richtungen des Halbraumes

Es ist das Integral

$$I = \int_{\text{Halbraum}} \cos\theta \cdot d\Omega \quad (2.3-1-1)$$

zu berechnen. Gemäß Bild 2.3-1-1 gilt:

$$d\Omega = \frac{dF}{r^2} = \frac{da \cdot db}{r^2} \quad (2.3-1-2)$$

Mit  $da = r \cdot d\theta$  und  $db = r \cdot \sin\theta \cdot d\phi$  wird

$$d\Omega = \sin\theta \cdot d\theta \cdot d\phi \quad (2.3-1-3)$$

und

$$I = \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} \int_{\phi=0}^{2\pi} \cos\theta \cdot \sin\theta \cdot d\theta \cdot d\phi = 2\pi \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} \cos\theta \cdot \sin\theta \cdot d\theta \quad (2.3-1-4)$$

Substituiert man  $\sin\theta = x$  und damit  $dx = \cos\theta \cdot d\theta$ , so erhält man

$$I = 2\pi \int_{x=0}^{x=1} x \cdot dx = 2\pi \left. \frac{x^2}{2} \right|_0^1 = \pi, \quad (2.3-1-5)$$

also:

$$\boxed{\int_{\text{Halbraum}} \cos\theta \cdot d\Omega = \pi} \quad (2.3-1-6)$$

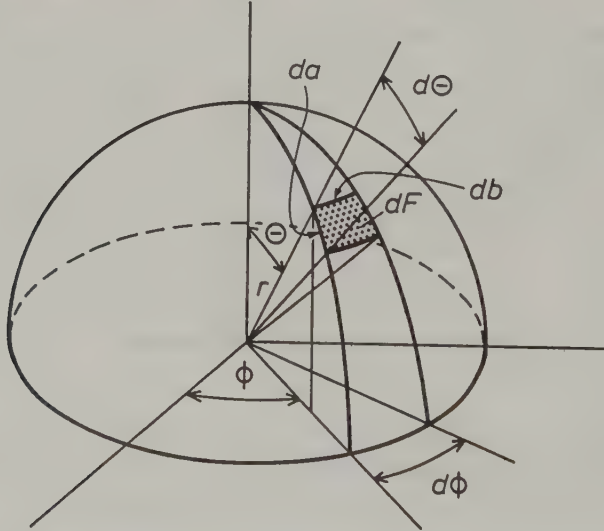


Bild 2.3-1-1: Zur Integration über die Richtungen des Halbraumes



### Anhang 2.3-2: Photometrische Einheiten

Das photometrische Einheitensystem baut auf dem Helligkeitsempfinden des menschlichen Auges auf. Zu jeder radiometrischer Größe R gibt es eine entsprechende photometrische Größe P, die aus der spektralen radiometrischen Größe  $R_\lambda = dR/d\lambda$  gemäß

$$P = K \int R_\lambda \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2.3-2-1)$$

ermittelt werden kann.  $V(\lambda)$  ist hier eine Funktion, die das Helligkeitsempfinden des menschlichen Auges beschreibt ("Van-Lamda-Kurve"). Die Werte von  $V(\lambda)$  wurden aus Versuchsreihen ermittelt und können in einschlägigen Büchern nachgesehen werden. Bild 2.3-2-1 zeigt  $V(\lambda)$  in graphischer Darstellung. K ist eine Konstante:

$$K = 683 \text{ Lumen pro Watt } [lm \cdot W^{-1}]. \quad (2.3-2-2)$$

Damit ist gleichzeitig die Einheit des "Lichtstromes"  $\Phi_p$ , das ist die dem Strahlungsfluß  $\Phi$  entsprechende photometrische Größe, definiert:

$$\Phi_p = K \int \Phi_\lambda \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad [lm]. \quad (2.3-2-3)$$

In der folgenden Tabelle sind die im Abschnitt 2.3 besprochenen radiometrischen Größen und die zugehörigen photometrischen Größen mit ihren Einheiten aufgelistet:

radiometrische Größen	photometrische Größen	Einheit
Strahlungsfluß $\Phi [W]$ (radiant flux)	Lichtstrom $\Phi_p$ (luminous flux)	Lumen $[lm]$
Bestrahlungsstärke $E [W \cdot m^{-2}]$ (irradiance)	Beleuchtungsstärke $E_p$ (illuminance)	Lux $[lx] = [lm \cdot m^{-2}]$
spezifische Ausstrahlung $M [W \cdot m^{-2}]$ (radiant exitance)	spezifische Lichtausstrahlung $M_p$ (luminous exitance)	$[lx]$
Strahlstärke $I [W \cdot sr^{-1}]$ (radiant intensity)	Lichtstärke (luminous intensity)	Candela $[cd] = [lm \cdot sr^{-1}]$
Strahldichte $L [W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}]$ (radiance)	Leuchtdichte (luminance)	$[cd \cdot m^{-2}]$

Zur Illustration der Größenordnung photometrischer Einheiten seien hier nur folgende Werte angegeben: Die Tageslicht-Beleuchtungsstärke einer horizontalen Fläche (Sonnenlicht plus Himmelslicht) beträgt bei 45° Sonnenstand an klaren Tagen ungefähr 80000 lx. Die Beleuchtungsstärke einer horizontalen Fläche im Schatten (nur Himmelslicht) ist ungefähr 13000 lx.

Vor allem in der englischsprachigen Fachliteratur wird eine Vielzahl weiterer photometrischer Einheiten verwendet. Die entsprechenden Umrechnungsfaktoren sind einschlägigen Büchern zu entnehmen.

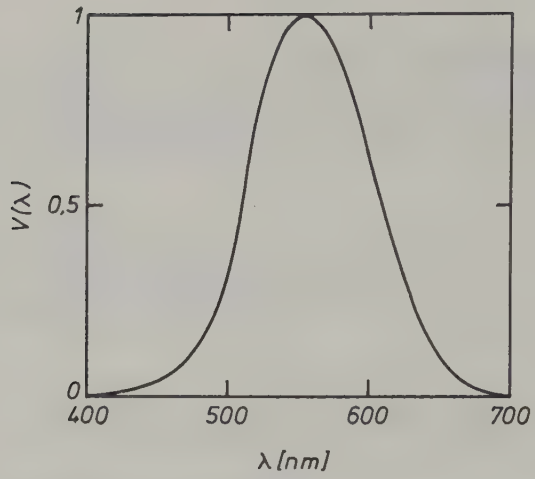


Bild 2.3-2-1: Helligkeitsempfinden des menschlichen Auges

Weiterführende Literatur:: Slater (1980), Vieth (1974).

Anhang 2.4-1: Ableitung des Lambert-Beer-Gesetzes

Der Strahlungsfluß  $\Phi(x)$  soll sich in x-Richtung um folgenden Betrag ändern ( $\mu$  = Absorptionskoeffizient):

$$d\Phi = -\mu \cdot \Phi(x) \cdot dx \quad (2.4-1-1)$$

Integration:

$$\int \frac{d\Phi}{\Phi(x)} = - \int \mu \cdot dx \quad (2.4-1-2)$$

$$\ln \Phi(x) + C_1 = -\mu \cdot x + C_2 \quad (2.4-1-3)$$

Zusammenfassung der beiden Integrationskonstanten  $C_1$  und  $C_2$ :

$$C_1 - C_2 = \ln C \quad (2.4-1-4)$$

(2.4-1-4) in (2.4-1-3):

$$\ln \Phi(x) + \ln C = -\mu \cdot x \quad (2.4-1-5)$$

$$\ln(\Phi(x) \cdot C) = -\mu \cdot x$$

$$\Phi(x) \cdot C = e^{-\mu \cdot x}$$

$$\Phi(x) = \frac{1}{C} e^{-\mu \cdot x} \quad (2.4-1-6)$$

Bestimmung der Konstanten C mit  $x = 0$ :

$$\Phi(0) = \frac{1}{C} \quad (2.4-1-7)$$

(2.4-1-7) in (2.4-1-6):

$\Phi(x) = \Phi(0) \cdot e^{-\mu \cdot x}$

(2.4-1-8)

Anhang 2.7-1: Horizontale Sichtweite (Slater, 1980)

Man blickt in horizontaler Richtung auf ein großes, dunkles (schwarzes) Objekt am Horizont (Bild 2.7-1-1). Aus der Richtung des schwarzen Objektes empfängt das Auge die Strahldichte  $L_0$ , aus der Richtung des unmittelbar darüber liegenden Teiles des Himmels die Strahldichte  $L_H$ . Der Kontrast zwischen Himmel und schwarzem Objekt ist

$$C = \frac{L_H - L_0}{L_H} \quad (2.7-1-1)$$

Die horizontale Sichtweite  $V_h$  ist definiert als jene Distanz vom schwarzen Objekt, aus der sich dieses mit einem Kontrast  $C = 0.02$  vom Himmel abhebt.

Die Strahldichte  $L_0$  und  $L_H$  sind durch die Streuung in die Atmosphäre bestimmt: Die in Luftvolumen zwischen Auge und Objekt bzw. Auge und "Himmel" (Grenze der Atmosphäre) seitlich einfallende Strahlung wird in Richtung zum Auge hin gestreut. Das Luftvolumen  $dF \cdot dx$  im Abstand  $x$  vom Auge streue den Strahlungsfluß  $d^3\Phi$  in Richtung zum Auge (siehe Bild 2.7-1-1).

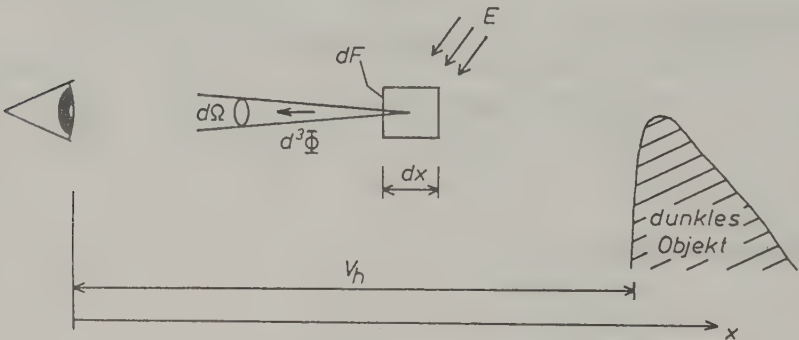


Bild 2.7-1-1: Ableitung der horizontalen Sichtweite  $V_h$

Es gilt:

$$d^3\Phi = K \cdot dF \cdot dx \cdot d\Omega, \quad (2.7-1-2)$$

wobei  $K$  ein vom Zustand der Atmosphäre und von den Einstrahlungsverhältnissen (Sonnenstand ! ) abhängiger Faktor ist. (2.7-1-2) sagt also aus, daß der in einen Raumwinkel  $d\Omega$  zum Auge hin gestreute Strahlungsfluß proportional zum streuenden Volumen  $dF \cdot dx$  und zum Raumwinkel  $d\Omega$  ist. (2.7-1-2) kann für den Fall seitlicher Einstrahlung (Bestrahlungsstärke  $E$ ) in den Sehpfad aus einer einzigen Richtung, die den Winkel  $\theta$  zur Blickrichtung einschließt, leicht verifiziert werden:

$$d^2I \stackrel{(2.3-4)}{=} \frac{d^3\Phi}{d\Omega} \stackrel{(2.7-2)}{=} E \cdot \beta_\theta \cdot dF \cdot dx \stackrel{E \cdot \beta_\theta = K}{=} K \cdot dF \cdot dx \quad (2.7-1-3)$$

Für den Fall beliebiger seitlicher Einstrahlung aus mehreren (allen) Richtungen ist analog zu argumentieren, wobei jedoch über alle Richtungen  $\theta$  zu summieren (zu integrieren) ist.

Von diesem Strahlungsfluß  $d^3\dot{\Phi}$  kommt gemäß Gleichung (2.7-7) der Anteil  $d^3\dot{\Phi} \cdot e^{-\beta_{\text{ext}} \cdot x}$  beim Auge an. Der Beitrag des Volumens  $dF \cdot dx$  zu der vom Auge "gesehenen" Strahldichte ist daher:

$$dL = \frac{(2.3-5) \cdot d^3\dot{\Phi} \cdot e^{-\beta_{\text{ext}} \cdot x}}{dF d\Omega} \stackrel{(2.7-1-2)}{=} \frac{K \cdot e^{-\beta_{\text{ext}} \cdot x}}{K \cdot e^{-\beta_{\text{ext}} \cdot x}} dx. \quad (2.7-1-4)$$

Hat der Sehpfad die Länge  $x_0$  (vom Auge aus gemessen), so wird

$$L = \int_{x=0}^{x_0} dL = K \int_{x=0}^{x_0} e^{-\beta_{\text{ext}} \cdot x} dx = \frac{K}{\beta_{\text{ext}}} \int_{x=0}^{x_0} e^{-\beta_{\text{ext}} \cdot x} d(\beta_{\text{ext}} \cdot x) =$$

$$= \frac{-K}{\beta_{\text{ext}}} e^{-\beta_{\text{ext}} \cdot x} \Big|_{x=0}^{x_0} = \frac{K}{\beta_{\text{ext}}} (1 - e^{-\beta_{\text{ext}} \cdot x_0}) \quad (2.7-1-5)$$

Für  $x_0 = \infty$  erhält man  $L_H$ :

$$L_H = \frac{K}{\beta_{\text{ext}}} \quad (2.7-1-6)$$

und für  $x_0 = V_h$  (horizontale Sichtweite) erhält man  $L_0$ :

$$L_0 = \frac{K}{\beta_{\text{ext}}} (1 - e^{-\beta_{\text{ext}} \cdot V_h}) \quad (2.7-1-7)$$

Damit ergibt sich aus (2.7-1-1), (2.7-1-6) und (2.7-1-7):

$$C = e^{-\beta_{\text{ext}} \cdot V_h} = 0.02 \quad (2.7-1-8)$$

und

$$\boxed{V_h = \frac{3.91}{\beta_{\text{ext}}}} \quad (2.7-1-9)$$



## LITERATUR

- Adam, J.A.: Peace keeping by technical means - counting the wapons. IEEE Spectrum, 46-56, July 1986.
- Akca, A., Hildebrandt, G., Huss, J., Kenneweg, H., Peerenboom, H-G., Rhody, B.: Luftbildmessung und Fernerkundung in der Forstwirtschaft. Herbert Wichmann Verlag, 480 Seiten, Karlsruhe, 1984.
- Albertz, J., Kreiling, W.: Photogrammetrisches Taschenbuch. 3.Aufl., Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe, 1980.
- Bähr, H.P. (Hrsg.): Digitale Bildverarbeitung. Wichmann Verlag, 401 Seiten, Karlsruhe, 1985.
- Bodechtel, J., Ackermann, F., Meissner, D., Seige, P., Winkenbach, H., Zilger, J.: MOMS-02 - A Sensor for Combined Stereoscopic and Multispectral Earth Observation. Presented Paper, 16. ISPRS-Kongreß, Kyoto, 1988.
- Boehnel, H.-J., Fischer, W., Knoll, G., Kadro, A.: Differences in spectral characteristics between healthy and diseased crops determined for sugar beets and winter barley. Int. Arch. of Ph., Volume XXIII, Part B7, 92-101, Hamburg, 1980.
- Campbell, J.B.: Introduction to remote sensing. The Guilford Press, New York-London, 1987.
- Chahine, M.T.: Interaction mechanisms within the atmosphere. Chapter 5 in: Manual of Remote Sensing, Volume I, Second Edition, ASP, 1983.
- Csaplovics, E.: Interpretation von Farbinfrarotbildern. Geow. Mitt. der TU Wien, 1982.
- Curran, P.: Principles of Remote Sensing. Longman Group Limited, 1985.
- de Loor, G.P. (ed.): Radar Remote Sensing. Remote Sensing Reviews, Band 1 Harwood Academic Publishers, 1983.
- Diercke Weltraum-Atlas: Georg Westermann Verlag, Braunschweig, 1981.
- Doyle, F.J., Murai, S.: Mapping with the Large Format Camera. Cartographic Accuracy of Stereo Space Photographs taken by Large Format Camera. Int. Arch. of Ph. and RS., Volume 26, Part 4, 731-737, Commission IV, Edinburgh, 1986.
- ESA SP-209: Proceedings of the Metric Camera Workshop held at Oberpfaffenhofen. European Space Agency Publication, ESA SP-209, 1985.
- Everitt, J.H., Richardson, A.J., Gausman, H.W.: Leaf Reflectance-Nitrogen-Chlorophyll Relations in Buffelgrass. PE&RS 51, 463-466, 1985.
- Fezer, F.: Lokalklimatologische Interpretation von Thermalluftbildern. BuL 43, 2-8, 1975.
- Goßmann, H.: Satelliten-Thermalbilder. Ein neues Hilfsmittel für die Umweltforschung ? Heft 16, Fernerkundung in Raumordnung und Städtebau der Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung, Bonn, 1984.
- Graham, R., Read, R.: Manual of Aerial Photography. Butterworth & Co., 1986.

- Henderson, F.M.: Active microwave imaging systems. In: Holz, R.K.: The Surveillant Science. Remote Sensing of Environment. John Wiley & Sons, 234-247, 1985.
- Hirt, H., Kellersmann, H.: Wärme-Infrarotmessungen als neue Informationsquelle für Planungszwecke. Siedlungsverband Ruhrgebiet, Schriftenreihe 44, 1972.
- Hofmann, O.: Geometrisches Auflösungsvermögen und Modulationsübertragung von Photosensoren. Bul 43, 174-181, 1975.
- Hofmann, O.: Digitale Aufnahmetechnik. Bul 50, 16-32, 1982.
- Jackson, R.D., Slater, P.N.: Absolute calibration of field reflectance radiometers. PE&RS 52, 189-196, 1986.
- Jansa, J.: Urban Study of Vienna Using Multitemporal Thematic Mappers Images. Remote Sensing: Towards Operational Cartographic Application, Proceedings des Willi Nordberg Symposiums, 191-193, Graz, 1987.
- Kawasaki, M.: Policies of Space Development in Japan. Int. Arch. of Ph. and RS., Volume 27, Part B11, pp.1250-1260, 16. ISPRS-Kongreß, Kyoto, 1988.
- Kitzmüller, J.: Die Minimaldifferenzen-Anfelderung. 8Z 71, 7-20, 1983.
- Kneizys, F.X. et al.: Atmospheric Transmittance/Radiance: Computer Code LOWTRAN6. AFGL-TR-83-0187, Environmental Research Papers, No 846, Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom AFB, Mass., 1983.
- Kähler, M., König, G.: Radiometrische Bildverarbeitung zur Erstellung eines Satellitenbild-Mosaiks. Int. Arch. of Ph. and RS., Volume XXV, Part A3a, 502-512, Rio de Janeiro, 1984.
- Konecny, G., Lehmann, G.: Photogrammetrie. 4. Aufl., De-Gruyter Verlag, Berlin, 1984.
- Krämer, J.: Map Production and Revision with Satellite Photographs taken by the MKF-6 Camera and by the Cameras KATE-140, KATE-200, and KFA-1000. Int. Arch. of Ph. and RS., Volume 27, Part B2, pp.501-512, 16. ISPRS-Kongreß, Kyoto, 1988.
- Kriebel, K.Th., Schlüter, W., Sievers, J.: Zur Definition und Messung der spektralen Reflexion natürlicher Oberflächen. Bul 43, 42-50, 1975.
- Lanzl, F.: The Three-Line Stereo Camera MEOSS and its Application in Space. Int. Arch. of Ph. and RS., Volume 27, Part B11, pp.1185-1195, 16. ISPRS-Kongreß, Kyoto, 1988.
- Leberl, F.: Accuracy Analysis of stereo side looking radar. PE&RS 45, 1083-1096, 1979.
- Lillesand, T.M., Kiefer, R.W.: Remote Sensing and Image Interpretation. John Wiley & Sons, 1979.
- Lintz, J., Simonett, D.S. (ed.): Remote Sensing of Environment. Addison-Wesley Publishing Company, Advanced Book Program, Reading, Massachusetts, 1976.
- Lorenz, D.: Der Einfluß einer Luftzwischen-schicht auf meteorologische Oberflächen-temperaturmessungen mit Radiometern. Tellus XXI, 76-88, 1979.

- Lorenz, D.: Die radiometrische Messung der Boden- und Wasseroberflächen-temperatur und ihre Anwendung insbesondere auf dem Gebiet der Meteorologie. Zeitschrift für Geophysik, Band 39, 627-701, 1973.
- Manual of Remote Sensing, Second Edition, Volume I, American Society of Photogrammetry, 1983.
- Mehlbreuer, A., Kähler, M.: Satellite Image Map of Arid Areas. An Example from Egypt. (Colourmap enclosed). Remote Sensing: Towards Operational Cartographic Application, Proceedings des Willi Nordberg Symposiums, 115-122, Graz, 1987.
- Meier, H.-K.: Progress by Forward Motion Compensation for Zeiss Aerial Camera. BuL 52, 143-152, 1984.
- Murtha, P.A., Mc Lean, J.A.: Remote sensing and vegetation damage - a theory for detection and assessment. PE&RS 44, 1147-1158, 1978.
- Nicolai, G.: Die neue Multispektralkamera MSK-4. Veröffentl. Nr. 76 des Zentralinstitutes für Physik der Erde, 88-91, Potsdam, 1984.
- Pfeiffer, B.: Richtungsabhängiges Strahlungsverhalten bei der Klassifizierung von multispektralen Flugzeugabstastdaten. DGK, Reihe C, Heft 290, 1983.
- Ranson, K., Daughtry, T., Biehl, L.: Sun Angle, View Angle, and Background Effects on Spectral Response of Simulated Balsam Fir Canopies. PE&RS 52, 649-658, 1986.
- Remmert, H.: Ökologie. 3. Aufl., Springer Verlag, 1984.
- Robinson, B.F. et al.: Performance evaluation and calibration of a modular multiband radiometer for remote sensing field research. SPIE (Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers), Volume 308, 146-157, 1982.
- Rodriguez, V., Gigord, P., de Gaujac, A.C., Munier, P.: Evaluation of the stereoscopic accuracy of the SPOT satellite. PE&RS 54, 217-221, 1988.
- Royer, A., Vincent, P., Bonn, F.: Evaluation and Correction of Viewing Angle Effects on Satellite Measurements of Bidirectional Reflectance. PE&RS 51, 1899-1914, 1985.
- Sabins, F.F.: Remote Sensing - Principles and Interpretation. W.H. Freeman and Comp., San Francisco, 1978.
- Schanda, E. (ed.): Remote Sensing for Environmental Sciences. Ecological Studies 18. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1976.
- Schanda, E.: Physical Fundamentals of Remote Sensing. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, 1986.
- Schmidt-Falkenberg, H.: Zur Statistik der Bildflüge in der BRD. BuL 47, 134-136, 1979.
- Schröder, M., Stätter, R.: Reflight of the Metric Camera on the Atlas-1 Mission. Int. Arch. of Ph. and RS., Volume 27, Part B11, pp.II502-II509, 16. ISPRS-Kongreß, Kyoto, 1988.
- Seger, M., Mandl, P.: Strahlungstemperaturbilder als Beitrag zur Stadtklimatologie von Klagenfurt. Klagenfurter Geographische Schriften, Band 5, 59-94, 1985.

- Sieber, A.J.: Forest Signatures in Imaging and Non-Imaging Microwave Scatterometer Data. ESA Journal 9/4, 431-448, 1985.
- Sievers, J.: Zusammenhänge zwischen Objektreflexion und Bildschwärzung in Luftbildern. DGK, Reihe C, Heft 221, München, 1976.
- Slater, P.N.: Remote Sensing - Optics and Optical Systems. Addison-Wesley Publishing Company, Advanced Book Program, Reading, Massachusetts, 1980.
- Stahl, K., Miosga, G.: Infrarottechnik. Dr. Alfred Hüthig Verlag, Heidelberg, 1980.
- Stock, P.: Interpretation von Thermalbildern der Stadt Dortmund. BuL 43, 144-151, 1975.
- Stock, P.: Erläuterungen zur synthetischen Klimafunktionskarte von Hagen. Abteilung für Kartographie und Luftbildwesen des Kommunalverbandes Ruhrgebiet der BRD, 1981.
- Swain, P.H., Davis, S.M.: Remote Sensing: The Quantitative Approach. McGraw Hill, 1978.
- Togliatti, G.: Some Results of the Metric Camera (MC) Mission-1 on Spacelab. Phia 41, 83-93, 1987.
- Turner, R.E., Malila, W.A., Nalepka, R.F.: Importance of atmospheric scattering in remote sensing, or everything you've always wanted to know about atmospheric scattering but were afraid to ask. Proc. 7<sup>th</sup> Symp. Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, Michigan, 1651-1697, 1971.
- Ulabý, F.T., Moore, R.K., Fung, A.K.: Microwave Remote Sensing: Active and Passive. Band 1 und 2: Addison-Wesley Publishing Company, Advanced Book Program, Reading, Massachusetts, 1981, 1982, Band 3: Artech House, 1986.
- Vieth, G.: Meßverfahren der Photographie. R. Oldenbourg Verlag, München, Wien - Focal Press, London, New York, 1974.
- Zirm, K., Fibich, F.: Überwachung thermischer Abwässer in Fließgewässern. Österreichisches Bundesinstitut für Gesundheitswesen, Wien, 1982.

#### VERVOLLSTÄNDIGUNG DER LITERATURHINWEISE

- Int. Arch. of Ph.: Internationales Archiv für Photogrammetrie.
- Int. Arch. of Ph. and RS.: Internationales Archiv für Photogrammetrie und Remote Sensing.
- Geow. Mitt. der TU Wien: Geowissenschaftliche Mitteilungen der Studienrichtung Vermessungswesen der Technischen Universität Wien.
- BuL: Bildmessung und Luftbildwesen, Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe.
- PE&RS: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- ÖZ: Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Photogrammetrie, Wien.
- DGK: Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München.
- Phia: Photogrammetria, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.





- A -

Abbildungsschaerfe, 81  
 Absorption der Atmosphaere, 60  
 Absorption elektromagnetischer Strahlung, 30  
 Absorptionsgrad, 36  
     spektral, 36, 53  
 Absorptionskoeffizient, 31, 37  
 Absorptionsspektren, 31  
     Chlorophyll, 35  
 abtastende Mikrowellenradiometer, 180  
 Abtaster (Fa. Daedalus), 123, 144  
 Abtaster (Konstruktionsverfeinerungen), 160  
 Abtaster als Strahlungsmesser, 146  
 Abtasteraufnahmen, 227  
 Abtastergleichung (radiometrisch), 150  
 Abtastergleichung (Zahlenbeispiel), 151  
 Abtastfrequenz, 123, 141, 168  
     beeinflusst NEP, 156  
 Abtastsysteme, 119, 164  
 Abtasttheorem, 136  
 Abtastung mit unterschiedlicher Bildelementgroesse, 127  
 aeussere Orientierung, 80  
 AFS (aerial film speed), 103  
 Albedo, 43  
 Allwettergeraete, 228  
 Amateurkamera, 75  
 Antenne, 175  
     SAR, 190  
     Seitensicht-Radar, 187  
 Antennengewinn, (Radar), 197  
 Antennentemperatur, 185  
 Apollo-Mission, 118  
 Ariane, 275  
 ASA-Zahlen (American Standards Association), 102  
 Atmosphaere, 15  
     beeinflusst Mikrowellen-Radiometer-Signal, 184  
     beeinflusst Photographie, 91  
     beeinflusst Thermalstrahlung, 149  
     Bestandteile, 60  
     in der Photographie, 110  
 Atmosphaerenmodell, 149  
 atmosphaerische Fenster, 16  
 Aufloesung:  
     geometrische, 82  
     radiometrische, 144  
     raeumliche (Mikrowellenradiometer), 179  
     raeumliche (SAR), 192  
     raeumliche (Seitensichtradar), 190  
     raeumliche, 82  
     spektrale, 116  
 Aufnahmeerichtung, 75  
 Aufnahmesysteme, 74  
 Ausbreitung elektromagnetischer Strahlung, 30

AVHRR (advanced very high resolution radiometer), 258

- B -

Bahnparameter (SPOT), 267  
Bahnparameter, 229  
Bahnstoerungen, 239  
Bandbreite eines zeitabhaengigen Signales, 141  
Beleuchtungsstaerke, 283  
Belichtung, 100  
Belichtungszeit, 100  
Beobachtungswinkel (Abtaster), 125  
Bestrahlung (Photographie), 100  
Bestrahlungsstaerke in der:  
    Bildebene, 92  
    Detektorflaeche, 150  
Bestrahlungsstaerke, 21  
    Bildebene (mit Reflexionsfunktionen), 69  
    Bildebene (nach Filter), 96  
    Bildebene (spektral), 29, 69  
    Bildebene, 27, 68, 89  
Bestrahlungszeit, 100  
Beugungsscheibchen, 175  
Beugungsunschaerfe, 82  
Bewegungskompensation, 85  
Bewegungsunschaerfe, 83  
Bildelement, 125  
Bildelementgroesse (Seitensicht-Radar), 189  
Bildflug (Ermittlung des atmosphaerischen Einflusses), 216  
Bildflugzeuge, 226  
Bildhauptpunkt, 75  
Bildmassstab, 80, 221  
    fuer Interpretationsaufgaben, 221  
    fuer Orthophotos, 223  
    und Blattschnitt, 223  
Bildwanderung, 84  
Blendenzahl:  
    Bestrahlungsstaerke, 89  
    Beugungsscheibchen, 82  
Bodenbeobachtungen, 206  
    bei Thermalaufnahmen, 228  
    beim Bildflug, 225  
Boltzmannsche Konstante, 53  
Brechungsindex, 30  
Brennweite, 81

- C -

CCD (charge coupled device), 165  
CCT (computer compatible tape), 122  
Chlorophyll, 49  
    Absorptionsspektrum, 34  
Columbus, 276

- D -

Datenempfangsstationen (Landsat), 243  
 db (Dezibel), 186  
 Deklination (Auswirkung auf Sonnenstand), 238  
 Densitometer, 100  
 Depressionswinkel (Radar), 189  
 Detaillierkennbarkeit im Abtasterbild, 139  
 Detektivitaet von Detektoren, 143  
 Detektorsystem, 139  
 Dichte (Photographie), 100  
 Dielektrizitaetskonstante, 30, 181, 203  
 Diffusor, 214  
 digitale Bildverarbeitung, 8  
 digitale Zeilenkamera, 165  
 Digitalisierung im Abtaster, 136  
 Digitalisierungsintervall, 136  
 DIN-Zahlen (Deutsches Institut für Normung), 102  
 Dispersion, 31  
 Dreizeilenkamera, 279

- E -

EAFS (effective AFS), 103  
 Earthnet, 243, 275, 279  
 Eindringtiefe (Mikrowellen), 180, 182  
 Eindringtiefe (Strahlung), 31  
 Eintagswiederholer (Bedingung), 234  
 elektrische Leitfaehigkeit, 181  
 elektrisches Feld, 12  
 elektromagnetische Strahlung in der Atmosphaere, 60  
 elektromagnetische Strahlung, 12  
     Teilchenmodell, 14  
     Wellenmodell, 14  
 elektromagnetische Welle, 13  
 elektromagnetisches Spektrum, 15  
 Elektronenvolt, 14  
 Emissionsgrad:  
     beeinflusst Thermalstrahlung, 148  
     einiger Stoffe, 57  
     Mikrowellen, 58, 182  
     spektral, 53  
 Emissionsvermoegen (Mikrowellen), 180  
 Emissionswerte vor Ort messen, 155  
 emittierte Erdstrahlung, 146  
 emittierte Objektstrahlung, 56  
 Empfindlichkeit (Detektoren), 140  
 Empfindlichkeit (Filme), 102  
 Energiefortpflanzung, 12  
 Energieniveau, 32, 52  
 EOSAT (Earth Observation SATellite), 243, 278  
 Erdstrahlung, 55  
 EROS-Data-Center (Earth Research Observation Systems), 243  
 ERS-1 (earth remote sensing satellite), 275  
 ERS-2, 275  
 ERTS-1 (earth resources technology satellite), 7, 240

ESA (European Space Agency), 273  
ESOC (European Space Operating Centre), 275  
ESRIN (European Space Research Centre), 275  
ESTEC (European Space Technology Centre), 273  
Eumetsat, 275  
Extinktionskoeffizient, 62

- F -

Falschfarbenfilm, 106, 221  
Farben, 94  
Farbfilm, 104, 110, 221  
Farbinfrarotfilm, 106, 110, 221  
Farbstoffe, 34  
Fernerkundung:  
    Anwendung, 8  
    Definition, 7  
    Zukunft, 273  
Fernerkundungssysteme, 10  
Filmart, 220  
Filme (Koernigkeit), 114  
Filme:  
    hart, 101, 103  
    normal, 101  
    weich, 101  
Filter (Photographie), 94  
Filterrad-Radiometer, 207  
Fliehkraft, 230  
Flughoehe (Abtaster), 123, 168, 227  
Flughoehe (Bildmassstab), 80  
Flughoehe (Luftaufnahmen), 221  
Flughoehe (Satelliten), 231, 239  
Flughoehe:  
    absolut, 223  
    ueber Grund, 223  
Flugplanung, 220  
Flugzeugaufnahmen, 164, 220  
FMC (forward motion compensation), 85  
Fourierreihe mit:  
    Ortsfrequenzen, 127  
    Zeitfrequenzen, 141  
Frequenz, 13, 15  
Fruehlingspunkt, 236

- G -

Gammastrahlung, 15  
Gelaendeform beeinflusst:  
    Radarbild, 195  
    reflektierte Strahlung, 90  
geometrische Aufloesung, Schwaerzungskurve, 103  
geometrisches Aufloesungsvermoegen, 82, 221  
    Abtaster, 125  
    Abtastung mit Flugzeug, 136  
    Abtastung mit Satelliten, 136  
    Gesamtprozess der Photographie, 114

- in Abtastrichtung, 134
- Mikrowellensysteme, 176
  - quer zur Abtastrichtung, 137
- geostationaere Satelliten, 233, 257
- geosynchrone Umlaufbahn, 231
- gerichteter Reflexionsgrad, 42
  - Beispiel, 45
  - im Photo, 91
  - Messung, 47, 218
- gleitende Mittelwertbildung (Abtastung), 127
- gleitende Mittelwertbildung als Faltung, 129
- Globalstrahlung (Messung), 214
- Globalstrahlung, 66
  - reflektierte (Messung), 213
- Gradation, 101
- Granulation, 114
- Graukeil, 100-101
- Gravitationskonstante, 230
- Grundfarben:
  - additive, 94
  - subtraktive, 94
- Grundscheier (Filme), 102

- H -

- HCMM (Heat Capacity Mapping Mission), 256
- HDDT (high density digital tape), 122
- Hermes, 276
- Himmelsstrahlung, 66
  - Messung, 214
- Hologramm, 193
- horizontale Sichtweite, 63, 286
- HRV (high resolution visible), 263

- I -

- Ifov (instantaneous field of view), 123
- inflight stereo, 279
- Infrarotfilme (Anwendung), 110
- Infrarotfilme (Aufbau), 106
- Infrarotstrahlung:
  - mittlere, 16
  - nahe, 16
  - thermische, 16
- Inklination, 231
- innere Orientierung, 75
- Integration ueber Halbraum, 282
- Interferenzfilter, 207
- IRS (information retrieval service), 275

- J -

- J-ERS-1 (Japanese earth remote sensing satellite), 279



- K -

Kalibrierungsproblem (digitale Zeilenkamera), 168  
 Kamera als Strahlungsmesser, 24, 66, 86  
 Kameragleichung (radiometrisch), 92  
 Kameratyp, 223  
     fuer hoechenmaessige Auswertung, 223  
     fuer Interpretationsaufgaben, 223  
 Kammerkonstante (Abtasterbild), 135  
 Kammerkonstante, 75, 81  
 Kartenmasstab, 222  
 Katastrophenueberwachung, 8  
 KATE-140, 273  
 KATE-200, 273  
 Keplersches Gesetz, 231  
 KFA-1000, 273  
 Koernigkeit (Filme), 114  
 Kommunikationssatelliten (DOMSAT), 243, 252  
 Kommunikationssatelliten (TDRS), 251  
 Komplementaerfarbe, 94  
 Kontrastausgleich (Kopierung), 103  
 Kontrastuebertragung (Abtaster), 125  
 Kontrastuebertragungsfunktion:  
     Bildelementgroesse, 133  
     Bildwanderung, 84  
 Kopiermoeglichkeiten, 114  
 Korpuskelmodell, 14  
 Korrekturmanoever (Satellitenbahn), 239

- L -

Laengsueberdeckung (Streifenflug), 224  
 Lambert-Beer-Gesetz, 31, 285  
 Lambertscher Strahler, 23  
 Landsat (Bahnen), 235  
 Landsat (Wiederholungszyklus), 234  
 Landsat, 8  
 Landsat-1 (Anordnung der Bilder), 244  
 Landsat-1 (Bahnparameter), 246  
 Landsat-1, 240  
 Landsat-1-Bilder (Querueberdeckung), 245  
 Landsat-2, 240  
 Landsat-3, 240  
 Landsat-4 (Bahnparameter), 250  
 Landsat-4, 247  
 Landsat-5, 247  
 Landsat-6, 253, 277  
 Landsat-7, 253, 277  
 Landsat-MSS (Produkte), 244  
 Landsat-TM (Bildanordnung), 253  
 Landsat-TM (Produkte), 252  
 Langley-Plot-Methode, 217  
 Leuchtdichte, 283  
 LFC (large format camera), 261  
 Lichtausstrahlung, spezifische, 283  
 Lichtgeschwindigkeit, 13, 30

Lichtpunkt (hot spot), 90  
 Lichtstaerke, 283  
 Lichtstrom, 283  
 Linienspektren, 33  
 Linsen-Spektralradiometer, 210  
 Linsenfehler, 82  
 Luftbildarchive, 227  
 Luftlicht, 66, 68  
     in der Photographie, 111  
     spektral, 68

- M -

magnetisches Feld, 12  
 Masseinheiten, 15  
 Maxwellsche Beziehung, 30  
 Mechanische Abtaster, 119  
 Medien unterschiedlicher Dichte, 36  
 Medium:  
     homogenes, 31  
     inhomogenes, 31  
 Mehrtagswiederholer, 234  
 menschliches Auge, 29, 54, 100, 136, 284  
 MEOS (monocular electro-optical stereo scanner), 279  
 Messbild (Hilfsabbildungen), 78  
 Messbild, 75  
 Messkamera im Spacelab, 255, 261  
 Messkamera im Weltraum, 273  
 Messkameras, 74  
     Jenoptik, 81  
     Wild, 81  
     Zeiss, 76, 81  
 Meteosat, 256, 275  
 Mie-Streuung, 64  
 Mikrodensitometer, 100  
 Mikrowellen, 18  
 Mikrowellenaufnahmen, 228  
 Mikrowellenempfaenger, 179  
 Mikrowellenradiometer (Nimbus), 258  
 Mikrowellenradiometer als Abtaster, 179  
 Mikrowellenradiometer, 176, 177  
 Mikrowellenradiometrie (Anwendungen), 186  
 Mikrowellenspektrum, 174  
 Mikrowellenstrahlung, 173, 177  
 Mikrowellensysteme, 173  
     aktive, 173, 187  
     passive, 173  
 militaerische Satelliten, 272  
 MKF-6 (Jenoptik), 116  
 MKF-6M, 273  
 MOMS (modularer opto-elektronischer Multispektral-Scanner), 166  
 MOMS (Stereo), 281  
 MOMS mit Space Shuttle, 259  
 MOS-1 (marine observation satellite), 278  
 MOS-2, 279  
 MSS (Landsat), 240

MSS (multispectral scanner), 122  
Multiband-Radiometer, 207  
Multispektralkamera, 116

- N -

Nachtbefliegungen, 228  
Nahbereichsphotogrammetrie, 88  
NASA (National Aeronautics and Space Administration), 240, 277  
NASDA (National Space Development Agency), 278  
Negativfarbfilm, 106  
NEP (noise equivalent power), 140  
nichtphotographische Flächensensoren, 172  
Nimbus-Satelliten, 258  
NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), 258  
NOAA-Satelliten, 258, 277

- O -

Oberflächenrauigkeit, 38  
    im Radar-Bild, 202  
Oberflächenreflexion, 37  
Oberflächentemperatur, 56  
Objektivverzeichnung, 76  
Öffnungswinkel (Abtaster), 123  
Opazität, 100, 186  
optische Dicke, 62  
    der Atmosphäre (Messung), 215  
optische Strahlung, 18  
opto-elektronische Abtaster, 165  
Orientierung:  
    äussere, 80  
    innere, 75  
overscan, 125

- P -

panchromatischer Schwarzweissfilm, 108, 221  
Panoramaverzerrung (digitale Zeilenkamera), 168  
Photodioden, 140  
photoelektrischer Effekt:  
    äusserer, 140  
    innerer, 140  
Photogrammetrie, Definition, 7  
Photographie, 94  
    Farbe, 104  
    farbinfrarot, 106  
    schwarzweiss, 99  
photographische Aufnahmen, 220  
photographische Folgeprodukte, 114, 221  
photographische Systeme, 74, 164  
photographischer:  
    Negativprozess, 99  
    Umkehrprozess, 99  
Photointerpretation:  
    absolut, 93

- Definition, 7
- relativ, 93
- visuell, 8
- Photokatode, 140
- photometrisches Einheitensystem, 29, 283
- Photomultiplier, 140
- Photonen, 14
- Photonenenergie, 14-15, 52
- Photonenstrom, 32
- Pixel (picture x element), 125
- Plancksches Strahlungsgesetz, 53, 146
  - Mikrowellenbereich, 58
- Plancksches Wirkungsquantum, 14
- Plattformgeschwindigkeit, 123, 168
  - beeinflusst NEP, 156
- polare Bahn, 238
- Polare Plattform, 276-277
- Polarisation (Mikrowellen), 178
- Polarisation (Radar-Impulse):
  - gleich, 200
  - kreuz, 200
- Polarisation:
  - horizontal, 181
  - vertikal, 181
- POP (polar plattform), 276
- Poseidon, 277
- Positivfarbfilm, 105, 114
- Praezession, 236
- praezessionsfreie Umlaufbahn, 236
- Probeaufnahmen, 103
- Projektionszentrum, 74
- push broom (Kehrbesen-scanning), 165

- Q -

- Quantendetektoren, 139
- Quantenphysik, 15
- Querueberdeckung (Blockverband), 224

- R -

- Radar (Radio Detection and Ranging), 187
- Radar, 18
- Radar-Altimeter, 177
- Radar-Bild:
  - Geometrie, 195
  - Informationsgehalt, 201
  - Radiometrie, 197
- Radar-Bilder (Anwendungen), 204
- Radar-Echo, 188
- Radar-Gleichung, 198-199
  - geneigtes Gelaende, 201
- Radar-Rueckstreuoeffizient, 199
- Radar-Rueckstreuquerschnitt, 198
- Radar-Schatten, 197, 201
- Radar-Systeme:

- abbildende, 176
- kohaerent, 193
- nichtkohaerent, 193
- Radiometer:
  - Multispektralabtaster, 146
  - passive Mikrowellensysteme, 177
  - photographische Kamera, 87
- Radiometrie, 18
- radiometrische Aufloesung abhaengig:
  - Blendenzahl, 157
  - geometrischer Aufloesung, 157
  - Reflexionsgrad, 157
  - spektraler Aufloesung, 157
- radiometrischen Referenzdaten, 206
- radiometrisches Einheitensystem, 29
- raeumliches Aufloesungsvermoegen, 82
- Rahmenmarken, 75
- Raumwinkel, 19
- rauschaequivalente Bestrahlung, 169
- rauschaequivalente Reflexionsgradaenderung, 144, 157, 169
- rauschaequivalente Strahlungsleistung NEP (digitale Zeilenkamera), 168
- rauschaequivalente Strahlungsleistung, 140, 156
- rauschaequivalente Temperaturaenderung, 144, 158, 179
- Rauschen (Detektorsignal), 140
- Rayleigh-Streuung (Radar), 202
- Rayleigh-Streuung, 63
- RBV (Landsat), 242
- RBV (return beam vidicon), 172
- Referenzstrahler (Abtaster), 148
- reflektierte Sonnenstrahlung, 56, 146
- Reflexion elektromagnetischer Strahlung, 36
- Reflexion:
  - diffus, 37
  - gerichtet, 37
- Reflexionsfunktion, 40
  - Beispiel, 43
  - Messung, 41, 47
  - Spiegel, 41
- Reflexionsgrad, 36
  - gerichtet, 41
  - spektral, 36, 53
- Reflexionsstandard, 214
- Rektaszension, 236
- Remote Sensing, 7
- Richtungsabhaengigkeit der Strahldichte, 90
- Richtungsabhaengigkeit der Strahlung, 40
- Richtungskugel mit Satellitenbahn, 232
- Richtungsverteilung reflektierter Strahlung, 39
- RMSG (root mean square granularity), 114
- Roentgenstrahlung, 15
- Rotationsabtaster, 119
- Rueckstrahler-Effekt (Radar), 203



- S -

SAR (synthetic aperture Radar), 190  
SAR-Bild, 255  
    digital verarbeitet, 193  
    optisch verarbeitet, 193  
Satelliten fuer die Meteorologie, 256  
Satellitenaufnahmen, 164, 229  
Satellitenbahn, 231, 233  
Scanner, 119  
Scatterometer, 176  
Schwaerzung (Photographie), 100  
Schwaerzungskurve, 101  
schwarzer Koerper, 53  
Schwarzweissfilm, 99, 108, 114, 221  
Schwarzweissinfrarotfilm, 110, 221  
SEASAT, 254  
Seitensicht-Radar, 176, 187  
    mit synthetischer Apertur, 190  
Sensoren, 74  
sichtbares Licht, 16  
Signal/Rauschverhaeltnis, 141, 156, 159  
    digitale Zeilenkamera, 168  
    MSS-Landsat, 241  
    TM, 251  
Signalisierung, 225  
sinc-Funktion, 133  
SIR (Shuttle Imaging Radar), 254  
SIR-A, 254  
SIR-B (Shuttle Imaging Radar B), 194, 254  
Skylab-Mission, 118  
SMMR (scanning multichannel microwave radiometer), 258  
Sofortbildprozess, 99  
Solarisationspunkt, 101  
Solarkonstante, 215  
solid earth mission, 276  
Sonnenstand (Satellitenaufnahmen), 239  
Sonnenstrahlung, 54, 66  
    direkte (Messung), 212  
sonnensynchrone Umlaufbahn, 236, 239  
Space Shuttle, 259-260  
Spacelab, 275  
Speckle-Effek, 193  
spektrale Bestrahlungsstaerke, 28  
spektrale Empfindlichkeit:  
    Detektoren, 140  
    Filme, 108  
spektrale Signaturen, 111  
spektrale spezifische Ausstrahlung, 28  
spektrale Strahldichte, 28  
spektrale Strahlstaerke, 28  
spektrale Zerlegung:  
    Beugungsgitter, 170  
    Mehrfachkamera, 165  
spektraler Reflexionsgrad, 48  
    Boden, 51

- gesunde Vegetation, 48
- Gewaesser, 51
- kranke Vegetation, 50
- spektraler Strahlungsfluss, 28
- Spektralradiometer, 206
  - abbildend, 206
  - Geraetespezifikationen, 212
  - nichtabbildend, 206
- spezifische Ausstrahlung, 21
- SPOT (Produkte), 271
- SPOT (Systeme Pour l'Observation de la Terre), 263
- SPOT Image, 271
- SPOT-1, 272
- SPOT-2, 272
- SPOT-3, 272
- SPOT-4, 272
- SPOT-Stereobild, 270
- Stefan-Boltzmannsches Strahlungsgesetz, 59
- Steradian, 19
- Stereo-MOMS, 280
- Stereoaufnahme, 224, 279
  - Radar, 229
- Stereomodell, 225
- Strahlbreitewinkel einer Antenne, 175
- Strahldichte, 22
- Strahlenbuen-del, 74
- Strahlstaerke, 21
- Strahlung, thermisch, 52
- Strahlungsfluss, 19
  - auf Detektor eines Linsenradiometers, 210
  - auf Detektoren eines Tubus-Spektralradiometers, 209
  - auf die Detektorflaeche, 147
  - zur Antenne, 179
  - zwischen Sender und Empfaenger, 23
- Strahlungsmessung, 18
- Strahlungspfade, 10, 66
- Strahlungstemperatur, 57, 153-154, 183
- Streukoeffizient, 61
- Streuung, 61
  - in der Atmosphaere, 60
  - von Strahlung, 34

- T -

- Tagfluege, 228
- TDI-Sensoren (time delay and integration), 169
- TDRS (tracking and data relay satellite), 252
- Temperatur, 52
- Temperaturmessung mit Abtastern (Flugbedingungen), 154
- Temperaturpasspunkte, 155
- Temperaturprofile der Atmosphaere aus Mikrowellenradiometermessungen, 186
- terrestrische Referenzmessungen, 206
- Thermalbilder:
  - Gewaesser, 160
  - Katastrophenueberwachung, 163
  - kranke Vegetation, 162

- staedtische Gebiete, 162
- Thermalstrahlung (Messung), 148
- Thermalstrahlung abhaengig von den Objekten, 160
- thermische Emission, 52
  - Mikrowellenbereich, 58
- Tiefenschaerfe, 81
- TM (technische Spezifikationen), 247, 250
- TM (Thematic Mapper), 247
- TM-Szene (Datenumfang), 253
- TM-Thermalbild, 249
- Topex, 277
- Transmissionsgrad (spektral), 36, 54, 63
- Transmissionsgrad, 36
  - Abtasteroptik, 148
  - Atmosphaere (Messung), 216
  - Atmosphaere, 15, 60, 173
    - Mikrowellenbereich, 185
  - Filter, 96
  - optisches Glas, 86
  - schraeger Strahlungspfad, 67
- Transparenz (Photographie), 100
- Tubus-Spektralradiometer, 209
- TV-Kamera, 172

- U -

- Ueberdeckungsregler, 77
- Uebertragungsfunktion, endliche Reaktionszeit des Detektors, 133
- Ultraviolettstrahlung, 16
- Umlaufbahn der Satelliten, 229
- Umlaufzeit (Satelliten), 231
- Umweltparameter, 8
- underscan, 125

- V -

- Vegetation:
  - im Radar-Bild, 203
  - in der Photographie, 111
- Vegetationsschaeden in der Photographie, 111
- Verlaufsfilter, 89
- Volumsreflexion, 37
- Volumsstreufunktion, 61

- W -

- Wasserflaechen im Radar-Bild, 203
- Wassergehalt im Radar-Bild, 203
- Wellenlaenge, 13, 15
- Wettersatelliten, 256, 277
- Wiensches Verschiebungsgesetz, 58
- Winkelgeschwindigkeit (Satelliten), 230

- 2 -

Zeilenschiefe (Rotationsabtaster), 119  
Zeitgleichung (Auswirkung auf Sonnenstand), 238  
Zeitreihen von Luftaufnahmen, 227  
Zentralprojektion, 74  
Zentripetalkraft, 230

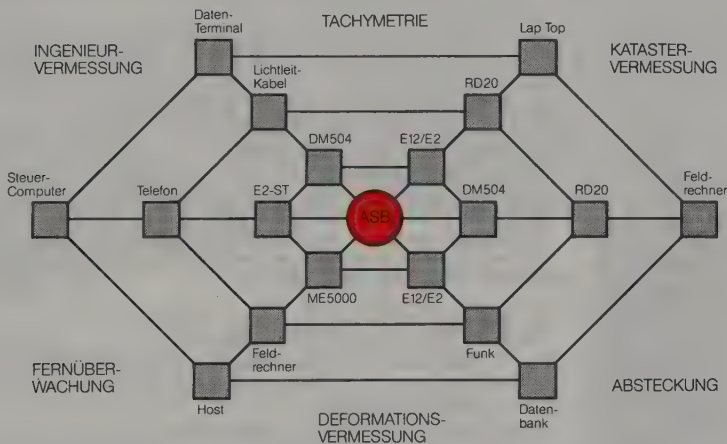
# Datenverkehr.

Ob Sie die Vorteile fortschrittlicher Elektronik für sich nutzen, oder ob Sie die Zeit mehr hinter Bedienungshandbüchern verbringen, ist weniger eine Frage der langen Leitung als der richtigen Verbindung. Den Datenverkehr zwischen Messinstrumenten und Peripheriegeräten.

den effizienten Umgang mit Zustandsgrössen, Befehlen und Messdaten und den Zusammenschluss von Einzelkomponenten zum flexiblen und erweiterbaren System, haben wir seit Jahren so gründlich studiert, wie in den 160 Jahren zuvor Feinmechanik und Präzisionsoptik.



# Mit der richtigen Verbindung.



Das ABC jedes elektronischen Kern-Instruments heisst deshalb bei uns heute einfach ASB. Über dieses einzigartige Interface-Bus-System kommunizieren alle Kern-Instrumente untereinander (und über RS 232-C auch mit anderen Peripheriegeräten). Mit ASB kontrollieren Sie Ihr Instrumentarium einfach und sicher. Jederzeit, real time, gezielt. Eine einzige Leitung ermöglicht Ihnen von der einfachen Verbindung «Theodolit-Computer» bis zur 12-Komponenten-Konfiguration vielseitige Kombinationen für den spezifischen Anwendungsfall. Und weil Sie mit ASB effizienter arbeiten und erst noch die Leistungs-

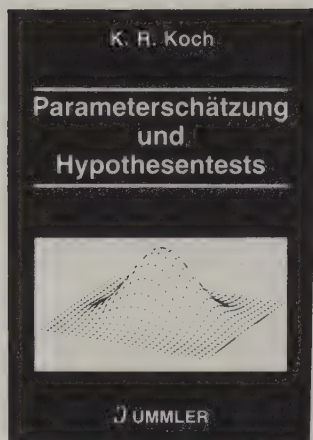
grenze und Einsatzmöglichkeiten Ihrer Kern-Instrumente erweitern, zahlt sich auch Ihre Investition bei Kern schneller aus.

Nehmen Sie mit uns Kontakt auf! Besuchen Sie uns am Geodätentag. Und stellen Sie fest, was heute zählt, um weiter zu kommen: Die richtige Verbindung.

**KERN**SWISS

Feldmesstechnik · CH-5001 Aarau · Telefon 004164-  
26 44 44 · Telefax 004164-24 80 22 · Telex 981106





## Ingenieurvermessung '88

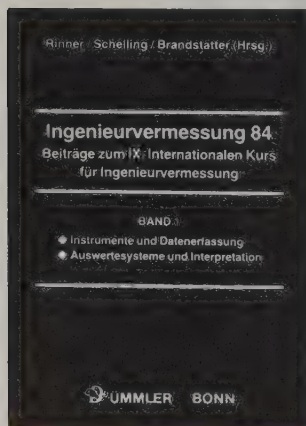
von K. SCHNÄDELBACH u.a. (Hrsg.)

60 Beiträge zum X. Internationalen Kurs für Ingenieurvermessung (12. bis 17. September 1988 in München).

792 Seiten, DIN A5. Zwei Bände. Abgabe nur geschlossen. Je Band DM 58,- Okt. 1988 (Dümmlerbuch 7808/09)

### Aus dem Inhalt:

**A. Instrumente und Datenerfassung:** Instrumentelle Entwicklung; Geräte- und Meßtechnik; Meßsysteme und Automatisierung. **B. Auswertesysteme und Interpretation:** Mathematische Modelle; Numerische und graphische Datenverarbeitung, raumbezogene Informationssysteme. **C. Hochbau und Anlagenbau:** Projekte – Aufgaben und Probleme; Projektdefinition, vermessungstechnische Grundlagen, baubegleitende Maßnahmen, Werkkataster. **D. Tiefbau und Untertagebau:** Projekte – Aufgaben und Probleme; Projektdefinition, vermessungstechnische und geotechnische Verfahren, Leitungskataster. **E. Umwelt- und Bauwerksüberwachung:** Aufgaben und Probleme; Spezielle Meß- und Regelungungsverfahren; Auswerteprozesse, Interpretation.



**FERD. DUMMLER'S VERLAG, Postfach 1480, 5300 BONN 1**

## Parameterschätzung und Hypothesentests In linearen Modellen

Von K. R. KOCH.

2., vollständig überarbeitete und erw. Auflage 1987. 390 Seiten. DIN A5. DM 58,-

ISBN 3-427-78922-5

(Dümmlerbuch 7892)

Auch in der zweiten Auflage wurde der bewährte Aufbau der ersten Auflage weitgehend beibehalten. Der Autor stellt die mehrdimensionalen Verfahren der Parameterschätzung und ihrer statistischen Beurteilung in sich geschlossen dar, um auch den Nicht-Spezialisten die Möglichkeit zu geben, sich in diese statistischen Methoden einzuarbeiten. Von der Vektor- und Matrixalgebra wird nur das Material präsentiert, das zum Verständnis der Parameterschätzung, der Hypothesenprüfung und Bereichsschätzung erforderlich ist. Mit zahlreichen Beispielen.

### Aus dem Inhalt der 2. Auflage:

Einführung (S. 1–3); 1. Vektor- und Matrixalgebra (S. 3–84); 2. Wahrscheinlichkeitstheorie (S. 85–172); 3. Parameterschätzung in linearen Modellen (S. 173–290); 4. Hypothesenprüfung, Bereichsschätzung und Ausreißertest im Gauß-Markoff-Modell (S. 291–336); 5. Diskriminierungsanalyse (S. 337–344); Literatur (S. 345–360); Sachverzeichnis.

## Ausgleichsrechnung

Von H. WOLF

**Teil I: Formeln zur praktischen Anwendung.**

**Vergriffen.**

**Teil II: Aufgaben und Beispiele zur praktischen Anwendung**

1979. 368 Seiten, 79 Abbildungen, Format 14,8×21 cm. Kart. DM 48,-

ISBN 3-427-78361-8

(Dümmlerbuch 7836)

### Aus dem Inhalt von Band II:

**Teil I:** Unkorrelierte Beobachtungen: Berechnung von mittleren Fehlern aus wahren Fehlern. Das Fehlerfortpflanzungsgesetz für unkorrelierte Beobachtungen. Die Ausgleichung unkorrelierter Beobachtungen. **Teil II:** Korrelierte Beobachtungen: Korrelations- und Gewichtsmatrizen. Das Fehlerfortpflanzungsgesetz für korrelierte Beobachtungen. Die Ausgleichung korrelierter Beobachtungen, Gruppenweise Ausgleichungen. **Teil III:** Statistische Prüfmethode: Anpassungstests. Varianzenquotienten-Test. Homogenitätstest nach Bartlett. Parameter-Teste. Ausreißer-Test. Namen- und Sachverzeichnis.

## Geodesy and the Earth's Gravity Field

Von E. GROTEN.

**Vol. I: Principles and Standard Methods**

1979. VIII/410 pages, 108 figures, English, Format 14,8×21 cm, Paperback, DM 48,-. ISBN 3-427-78371-7 (Dümmlerbuch 7837)

**Vol. II: Geodynamics and Advanced Methods**

1980. VI/324 pages, 110 figures, English, Format 14,8×21 cm, Paperback, DM 48,-. ISBN 3-427-78381-2 (Dümmlerbuch 7838)

**Aus dem Inhalt von Band II:** Geodetic gravimetry. The boundary value problem. The tides of the solid earth and related topics of geodetic interest. Inertial geodesy. Space methods. Geodynamics and geodesy. Appendices, References. Index.

## Ingenieurvermessung '84

Von K. RINNER / G. SCHELLING / G. BRANDSTETTER (Hrsg.)

**85 Beiträge zum IX. Internationalen Kurs für Ingenieurvermessung (6.–13. Sept. 1984 in Graz).**

Mit englischen und französischen Summaries.

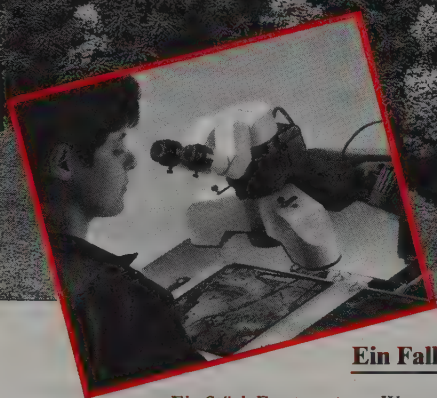
812 Seiten. DIN A5. Zwei Teile. Abgabe nur geschlossen. Je DM 58,-

**Band 1:** Instrumente u. Datenerfassung; Auswertesysteme u. Interpretation. ISBN 3-427-78931-4 (Dümmlerbuch 7893)

**Band 2:** Hochbau, Anlagebau u. Wasserbau; Tiefbau u. Untertagebau; Gelände- u. Bauwerksüberwachung, Beweissicherung; Betriebl. Führung. ISBN 3-427-78941-1 (Dümmlerbuch 7894)

**Band 3: (Nachtragsband):** Eröffnung des Kurses; Ergänzende Beiträge; Empfehlungen. 1985. 168 Seiten. DIN A5. DM 28,- ISBN 3-427-78971-3 (Dümmlerbuch 7897)

# WAS PASSIERT IN DIESEM WALD?



Ein Stück Forst auf infrarotempfindlichem Film. Aufgenommen mit dem Wild-Luftbildaufnahmesystem AVIOPHOT.

Unter dem neuen Stereo-Interpretationsgerät AVIOPRET Wild APT2 erkennt man nicht nur feinste Farbnuancen, sondern stark vergrößert in den Baumwipfeln auch Blattwerk, Nadeln und Geäst dreidimensional: krankhafte Veränderungen werden so deutlich sichtbar.

## Ein Fall für die Untersuchung mit AVIOPRET Wild APT2.

Was qualifiziert dieses Stereo-Interpretationsgerät AVIOPRET Wild APT2 für solche Untersuchungsaufgaben besonders?

- Seine **erstklassige Optik mit Zoomsystem** ermöglicht Ihnen die volle Ausschöpfung des hohen Informationsgehalts der Luftbildpaare
- Die **farbneutrale, regelbare Durchlichtbeleuchtung** garantiert eine unverfälschte Wiedergabe von Farb- und Farbinfrarot-Aufnahmen bei der Interpretation
- Mit seinem **Bildwagen** können Sie ohne ständige Neuorientierung und unter kontinuierlicher, räumlicher

Betrachtung bequem von Detail zu Detail wandern

- Sie können damit **bequem messen, markieren und zeichnen** sowie mit einem Photoaufsatz vergrößerte Bildausschnitte herstellen
- Mit dem **Diskussionstabus** können Sie mit einem weiteren Betrachter sich gemeinsam Klarheit verschaffen

Bitte telefonieren oder schreiben Sie uns, wenn Sie mehr über die Möglichkeiten der Luftbildinterpretation mit Wild-Instrumenten wissen möchten. ■

**WILD**  
HEERBRUGG

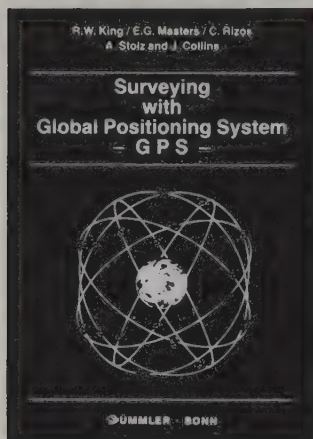
Markenzeichen  
weltbekannter Produkte  
aus dem  
Wild Leitz Konzern

Wild Heerbrugg AG · CH-9435 Heerbrugg  
Schweiz · Tel. 071/70 31 31



**WILD LEITZ**





## Surveying with Global Positioning System (GPS)

Von R. W. KING, E. G. MASTERS, C. RIZOS, A. STOLZ, J. COLLINS.

Reprint of the first edition, published in 1985 by School of Surveying, Kensington, Australia. 128 pages. DIN A4. Subskriptionspreis bis 30.09.87 DM 38,-; danach DM 48,-

ISBN 3-427-78551-3

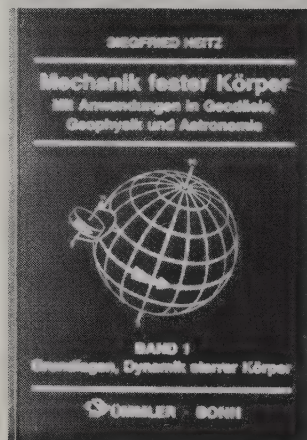
(Dümmlerbuch 7855)

The Global Positioning System (GPS) is revolutionizing surveying technology. GPS shifts the science of surveying operations from ground-to-ground measurements to ground-to-sky.

This outline on GPS grew out of a set of lecture notes which the authors prepared for a workshop on GPS held at the University of New Wales, Kensington, Australia.

### Table of contents:

Chapter 1: The Global Positioning System (pages 1–10); Chapter 2: GPS Receiver Technology (11–23); Chapter 3: Surveying with GPS (24–39); Chapter 4: Time, Earth Rotation, Reference Systems and Geodetic Datums (40–54); Chapter 5: Data Processing (55–85); Chapter 6: Height Determination Using GPS (86–97); Chapter 7: Satellite Orbital Motion (98–120); References (121–128).



## Mechanik fester Körper

mit Anwendungen in der Geodäsie, Geophysik und Astronomie

Von S. HEITZ

### Band 1: Grundlagen, Dynamik starrer Körper

1980. X, 399 Seiten, 39 Abbildungen, Format DIN A5. Kart. DM 48,-

ISBN 3-427-78951-9

(Dümmlerbuch 7895)

#### Aus dem Inhalt:

Einleitung. Kartesische Tensoren. Kinematik. Grundlagen der Dynamik. Prinzipien der Mechanik. Dynamik starrer Körper. Dynamik von Punktmassen. Literatur. Sachregister.

### Band 2: Dynamik elastischer Körper, mechanische Grundlagen der Geodäsie

1984. 472 Seiten, 46 Abbildungen, Format DIN A5, kartoniert, DM 58,-

ISBN 3-427-78961-6

(Dümmlerbuch 7896)

#### Aus dem Inhalt:

Dynamik elastischer Körper. Methode der finiten Elemente in der Elastostatik. Dynamik elastischer Erdkörpermodelle. Mechanische Grundlagen geodätischer Modelle. Mathematische Grundlagen. Literatur. Sachregister.



## Koordinaten auf geodätischen Bezugsflächen.

Von S. HEITZ

1985. 247 Seiten, 20 Abbildungen, Format DIN A5. Kart., DM 38,-

ISBN 3-427-78981-0

(Dümmlerbuch 7898)

Alle Zweige der Geodäsie beschäftigen sich direkt oder indirekt mit der Koordinierung von Beobachtungsstationen der Erdoberfläche. Hierbei dominieren auf geoidnahen „geodätischen Bezugsflächen“ basierende Koordinatensysteme, die sich aus Flächenkoordinaten auf und Höhenkoordinaten über der Bezugsfläche zusammensetzen. Erstgenannte Flächen- oder Lagekoordinaten bilden den Hauptgegenstand dieses Buches, worin die wichtigsten Grundlagen sowohl für beliebige Bezugsflächen als auch für Rotationsellipsoide dargestellt werden, denen in der geodätischen Praxis nach wie vor eine herausragende Bedeutung zukommt.

#### Aus dem Inhalt:

Einführung; Allgemeine mathematische Grundlagen; Darstellung der Transformationsgleichungen zwischen Flächenkoordinaten durch Potenzreihen; Flächenkoordinaten auf Rotationsellipsoiden; Dreidimensionale Probleme (insbesondere Abbildung des dreidimensionalen Raumes auf eine Bezugsfläche mittels der Flächennormalen).

FERD. DÜMMLER<sup>S</sup> VERLAG, Postfach 1480, 5300 BONN 1





## Rolleimetric RS1. Automatisierte digitale Meßwerterfassung. Neue Konzepte in der Photogrammetrie.

Ingenieuranwendungen in der Nahbereichsphotogrammetrie erfordern hohe Meßgenauigkeit der Bildkoordinaten im Mikrometerbereich.

Rollei Fototechnic weist mit der Entwicklung des Réseau Scanners RS1 neue Wege in der photogrammetrischen Meßtechnik.

Photogrammetrische Bilder werden maschenweise mit einem CCD-Sensor erfaßt und digital gespeichert. Für die Punktmessung kommen Bildverarbeitungsalgorithmen zum Einsatz, die einen automatisierten Meßvorgang ermöglichen. Durch das Réseauprinzip wird die hohe Positioniergenauigkeit des CCD-Sensors realisiert. Das Meßsystem liefert mit der zugehörigen Betriebssoftware

Maschinen- oder Bildkoordinaten und wird zur Digitalisierung transparenter Vorlagen eingesetzt. Integriert in die photogrammetrische Nahbereichssoftware Rolleimetric MR2 liefert RS1 3D-Objektkoordinaten oder erhält Näherungswerte für die automatische Meßbildabtastung.

Der Rolleimetric Réseauscanner RS1 hat ein nutzbares Format von 230x230mm. Die Auflösung erfolgt mit einer Pixelgröße von etwa  $5 \times 8 \mu\text{m}$  mit 256 Grauwerten. Die Steuersoftware läuft unter DOS auf 80386-Rechnern mit einer FG100 Bildverarbeitungskarte.

Für weitere Informationen wenden Sie sich bitte an Rollei Fototechnic.



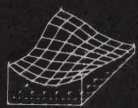
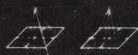
**Rollei**  
fototechnic

**Rollei Fototechnic GmbH & Co. KG**  
Salzdahlumer Straße 196  
3300 Braunschweig



KARL KRAUS

## PHOTOGRAMMETRIE



BAND 1

Grundlagen und Standardverfahren  
Mit Beiträgen von P. Waldhäusl

DÜMMLER / BONN

H. Pelzer and W. Niemeier (Ed.)

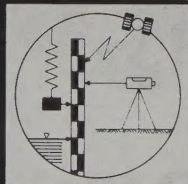
PRECISE LEVELLING  
Contributions to the  
Workshop on Precise Levelling



DÜMMLER BONN

H. Pelzer and W. Niemeier (Editors)

## DETERMINATION OF HEIGHTS AND HEIGHT CHANGES



DÜMMLER BONN

## Photogrammetrie.

Von K. KRAUS

Mit Beiträgen von P. Waldhäusl.

Auswahl und Gliederung des Stoffes bieten den Studenten einen leichten Einstieg in die komplexe photogrammetrische Technik, wie sie heute in der Praxis betrieben wird. Die zweite Auflage des Buches bot außerdem Gelegenheit, den Inhalt zu aktualisieren. Dem Praktiker bietet dieses Werk die Möglichkeit, den Anschluß an die Denkweise der neuzeitlichen Photogrammetrie zu finden. Für die technisch orientierten Nachbardisziplinen ist Band 1 eine komprimierte Darstellung der Grundlagen und Standardverfahren der Photogrammetrie. Er legt die Basis für die in der Photogrammetrie immer wichtiger werdende interdisziplinäre Zusammenarbeit. Auch die nichttechnisch ausgerichteten Nachbardisziplinen werden im Manuskript über große Bereiche wertvolle Informationen finden.

### Band 1: Grundlagen und Standardverfahren

2., bearbeitete und erweiterte Aufl. 1985, 352 Seiten, zahlr. Abb., Übungsbeispiele und Aufgaben, Format 16,5×24 cm. Kart. DM 54,-.  
ISBN 3-427-78642-0 (Dümmlerbuch 7864)

Aus dem Inhalt von Band 1:

**A Grundzüge der Photogrammetrie** (S. 1–293)

1. Einleitung; 2. Einige mathematische Vorbemerkungen; 3. Die physikalische Realität der photogrammetrischen Aufnahme; 4. Zweibildauswertung; 5. Aerotriangulation; 6. Orthophotographie und Entzerrung. Literatur. Register.

### Band 2: Theorie und Praxis der Auswertesysteme

2. Aufl., 1987. 415 Seiten, 175 Abb. und Tabellen, Format 16,5×24 cm. Kart. DM 58,-.  
ISBN 3-427-78652-8 (Dümmlerbuch 7865)

Aus dem Inhalt von Band 2:

**B Theorie und Praxis der photogrammetrischen Punktbestimmung** (S. 1–116)

1. Zweck der Punktbestimmung; 2. Auswahl und Festlegung der Punkte; 3. Einpassung und Auswertung eines Einzelmodells; 4. Gemeinsame Einpassung eines Modellverbandes (Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen); 5. Gemeinsame Einpassung eines Bildverbandes (Bündelblockausgleichung); 6. Ausgleichung hybrider Beobachtungen; 7. Suche grober Fehler und Qualitätskontrolle; 8. Berücksichtigung der Erdkrümmung und der Verzerrungen der Landeskoordinatensysteme; 9. Anwendungsbeispiele für die photogrammetrische Punktbestimmung. **C Photogrammetrische Auswertesysteme, Digitale Modelle und Datenbanken** (S. 117–322)

1. Allgemeines über Hard- und Software; 2. EDV-gestützte photogrammetrische Auswertesysteme; 3. Algorithmen für digitale Modelle. **D Stereorthophotographie** (S. 323–336)

1. Grundgedanke; 2. Auswertverfahren und Geräte; 3. Genauigkeit des Stereophotos; 4. Nichtlineare x-Parallaxen; 5. Hinweise zur Stereorthophotoherstellung; 6. Anwendungen der Stereorthophotographie. **E Photogramm. Kataster- und Stadtvermessung** (S. 337–368)

1. Grenzpunktvermessung; 2. Verdichtung des Festpunktfeldes; 3. Mehrzweckkatasterkarte; 4. Landnutzungsbeurteilung; 5. Stadtkarte. **F Der Photogramm. Beitrag zur Kartenrevision** (S. 369–383)

1. Orthophotokarte; 2. Strichzeichnungen als Kartenoriginale; 3. Digital gespeicherte Kartenoriginale. Sachregister

## Precise Levelling

Von H. PELZER / W. NIEMEIER.

38 Contributions to the Workshop on Precise Levelling held at the University of Hannover. March 16–18, 1983.

504 pages with many illustrations. Trim-size DIN A5. Pb. DM 72,-

ISBN 3-427-78561-9 (Dümmlerbuch 7856)

## Determination of Heights and Height Changes

Hrsg. v. H. PELZER / W. NIEMEIER.

58 Contributions to the Symposium on Height Determination and Recent Vertical Crustal Movements in Western Europe. September 15–19, 1986.

768 pages. DIN A5. Subskriptionspreis bis 30. 9. 87 DM 84,-; danach ca. DM 96,-

ISBN 3-427-78621-8

(Dümmlerbuch 7862)

FERD. DÜMMLER'S VERLAG, Postfach 14 80, 5300 BONN 1





 **DÜMMELERbuch 7866**